UN INSTRUMENTO MATEMATICO UNIVERSAL: LO INVARIANTE

INVESTIGACION y CIENCIA

ABRIL 2003
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MAGNETOESTRELLAS

NEUROBIOLOGIA DEL SUICIDIO

INVENCION POR EVOLUCION

MALFORMACIONES EN ANFIBIOS

CATALISIS

CAOS EN LA ESCALA CUANTICA





Abril de 2003 Número 319

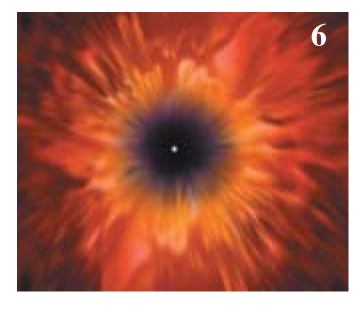
SECCIONES



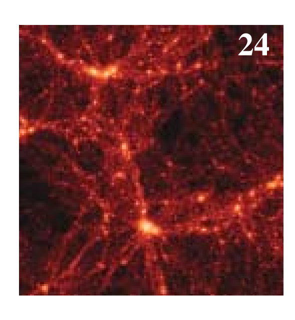












SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
REVIEWS EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Graham P. Collins, Carol Ezzell,
Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL
Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER
Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Magnetoestrellas*; José Manuel García de la Mora: *Neurobiología del suicidio*; Luis Bou: *Invención por evolución, Un instrumento matemático universal: los invariantes* y *Aventuras problemáticas*; Iñigo Martínez Solano: *Malformaciones en anfibios*; Carmina Fuster: *La bebida, ¿beneficiosa para la salud?*; José Luis Trueba: *Caos en la escala cuántica*; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Don Dixon

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

GRIPE E INMUNIDAD. «Desde 1933, las características serológicas del virus A han cambiado siete u ocho veces; en cada ocasión el cambio se manifestó en todo el mundo antes de un año. La gripe A2, a poco de descubrirse en EE.UU., apareció en Australia e Inglaterra. Una vez prendió, no volvieron a aparecer cepas A1 en lugar alguno. Y así en cada cambio sucesivo. Se trata de un parásito cuyo único hospedador natural es el hombre. Para sobrevivir, debe pasar continuamente de una persona a otra por inhalación; se aloja en las vías respiratorias. Pero no tarda en encontrarse en la situación que los epidemiólogos llaman de "agotamiento de hospedadores vulnerables". En otras palabras, la población casi entera se ha vuelto inmune. Un virus tan contagioso se enfrenta a esa situación cambiando de características, mutación que le permite vencer la inmunidad de su hospedador. —Sir Macfarlane Burnet» [*Nota de la redacción: Burnet compartió el premio Nobel de 1960 de Fisiología y Medicina "por el descubrimiento de la tolerancia inmunitaria adquirida."*]

BÚSQUEDA MASIVA. «La partícula elemental correspondiente al campo gravitatorio se ha bautizado como gravitón. Pocas dudas caben acerca de su existencia, en un sentido matemático formal. Pero nunca se ha observado un gravitón. Dada la bajísima intensidad de la interacción gravitatoria, en la práctica sólo las masas muy grandes producen efectos gravitatorios observables. En el caso de las masas grandes, el número de gravitones que intervienen en la interacción es muy elevado; el campo se comporta como un campo clásico. En consecuencia, numerosos físicos creen que nunca se observará el gravitón aislado. Su existencia real es una de las cuestiones sin resolver más importantes de la física. —Freeman J. Dyson»

...cien años

DESAFÍO ANTÁRTICO. «Llegan noticias de que el 'Discovery' penetró en el banco de hielo el 23 de diciembre de 1901, en la latitud 67. El 24 de marzo, el barco estaba inmovilizado por los hielos, pero la expedición pasó un confortable invierno junto a los montes Erebo y Terror. El dos de septiembre fueron despachadas dos expediciones en trineo. La mejor marca fue la del capitán Robert F. Scott, el doctor Edward Wilson y el teniente Ernest Shackleton. Esos intrépidos exploradores viajaron 150 km hacia el sur, tocando tierra en los 80 grados y 17 minutos de latitud. Es éste el punto más meridional hasta ahora alcanzado. La expedición resultó una prueba durísima para la resistencia de hombres y animales. Los perros perecieron todos y, en el regreso, los trineos tuvieron que ser arrastrados por hombres. Las inclemencias del tiempo casi mataron al teniente Shackleton.»

MOTOCICLISMO MÁS AGRADABLE. «El creciente interés por los velomotores es atribuible directamente a las muchas mejoras que han colocado a varias marcas en unos niveles de excelencia muy altos. El motociclo 'Indian' es un tipo de máquina que se ha popularizado mucho en el mundillo ciclista. A la construcción de su motor se ha dedicado un gran esmero y, merced a unas minuciosas pruebas bajo todas las condiciones, se ha conseguido en ella una eficiencia muy alta.» [*Nota de la redacción: Antes de la I Guerra Mundial, la Compañía de Motociclos Indian era el mayor fabricante mundial de motos.*]



Velomotor Indian*, 1903*

...ciento cincuenta años

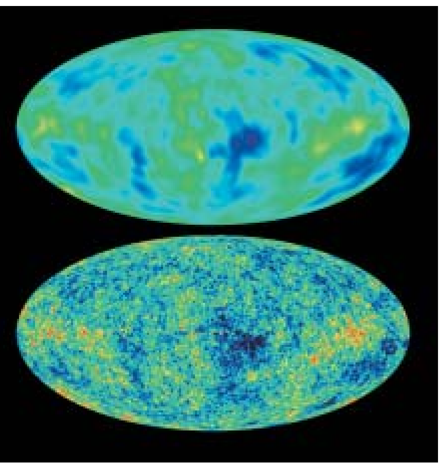
VOLANDO COMO UN PEZ. «Theodore Poesche ha presentado un proyecto de navegación por la atmósfera con una barquilla movida por un motor de vapor y sin emplear un globo. Su plan consiste en construir una nave, larga y estrecha, de madera con unas alas de lona e impulsada por una hélice accionada por la energía del vapor. 'Mi nave', afirma, 'se asemeja muchísimo al pez volador, que avanza gracias al movimiento espiral de su cola mientras sus aletas extendidas lo sustentan en el aire.' Hace tiempo que se propusieron las hélices para propulsar aeronaves sustentadas por globos, pero entonces no se consiguió. Conseguirlo ahora sin globo es un imposible.»

APUNTES

ASTROFISICA

Contradicción cósmica

La medición del fondo cósmico de microondas por el satélite WMAP ha tenido mucha repercusión en la prensa. La atención se ha centrado en la determinación más exacta de algunos parámetros cósmicos, como la edad del universo. Esos resultados ratifican el modelo cosmológico vigente desde que se descubriese que la expansión del universo se acelera. Sin embargo, WMAP ha arrojado también algún dato más problemático. Unos 400.000 años después de su nacimiento, el universo estaba lo bastante frío como para que se ligasen electrones y protones. Muchísimo más tarde, los astros, ya formados, bañaron el universo con radiación suficiente para reionizar el hidrógeno. WMAP ha establecido una fecha curiosa sobre dicha reionización; la cifra, aunque la imprecisión es considerable, en unos 200 millones de años tras el nacimiento del universo. Ese guarismo choca con la existencia de una franja de frecuencias, o depresión de Gunn-Peterson, donde se anulan los espectros de los cuásares más lejanos, cuyo desplazamiento al rojo es un poco mayor que 6. La causa de esa supresión ha de ser la pervivencia de un residuo importante de hidrógeno neutro. La reionización, pues, hubo de completarse en torno a un desplazamiento al rojo del orden de 6, o dicho de otra manera, unos mil millones de años después del nacimiento del universo, no antes. La verdad es que ya existían resultados teóricos que indican una manera de conciliar ahora la lección del fondo cósmico con la de los cuásares. Como explicaron en 2002, por un lado Cen, por otro Wyithe y Loeb, quizá hubo dos reionizaciones, separadas por un breve período de recombinación. Pudo ocurrir así: las primeras estrellas, muy pesadas y calientes, sin metales, de la llamada Población III ionizaron el medio intergaláctico, pero al mismo tiempo lo calentaron hasta el punto de que disminuyó el ritmo de formación de estrellas y se produjo una recombinación de electrones y protones. Luego, una generación posterior de estrellas, más metalizada y fría, volvió a ionizar el medio cientos de millones de años después. Para que las cosas fueran así, la Población III debió satisfacer ciertas condiciones; si no, habría que suponer que actuó alguna fuente ionizadora no estelar desconocida.



El universo a los 380.000 años de edad, visto hace diez por el satélite COBE (arriba) *y ahora por el WMAP, con una capacidad de resolución mucho mayor. Amarillos y rojos indican regiones más calientes; los azules, más frías*

GENETICA VEGETAL

Otra oportunidad para la vida

Puede que revivir la adolescencia no sea posible, pero las plantas disfrutan de una segunda oportunidad de desarrollarse. Los retoños nuevos, recién salidos de sus semillas, suspenden su crecimiento si el entorno se vuelve peligroso, como durante los veranillos de San Martín o las sequías no estacionales. Expertos en biología molecular vegetal de la Universidad Rockefeller que investigan la *Arabidopsis thaliana*, una mala hierba, han descubierto una proteína que interviene en esa revitalización del vegetal. El compuesto, de nombre AFP, reinicia el desarrollo previamente detenido merced a su enlace con otra proteína, la ABI5, responsable, según habían hallado antes los investigadores, de la detención. “La AFP y la ABI5 son como el yin y el yang”, afirma Luis López Molina, uno de los descubridores de la proteína. Ulteriores estudios que localicen moléculas que favorezcan a una u otra proteína podrían contribuir a la resistencia de las cosechas ante las sequías o a la salvación de unas semillas de otro modo perdidas a causa de un brote prematuro. El trabajo aparece en el número del 1 de febrero de *Genes & Development*.
—*Charles Choi*



La germinación puede iniciarse, detenerse y proseguir

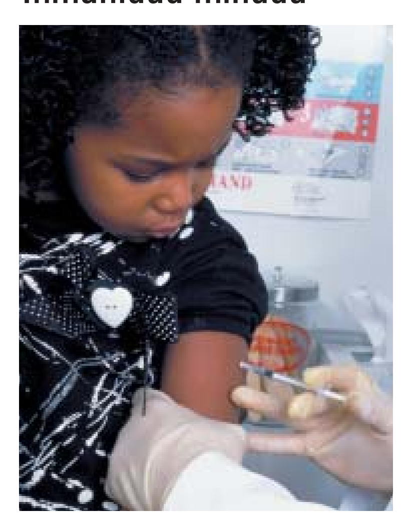




NASA/WMAP SCIENCE TEAM (*arriba*); J. BURGESS *Photo Researchers, Inc.* (*abajo*)

BIOLOGIA MOLECULAR

Inmunidad minada



Las vacunas se basan en la capacidad del sistema inmunitario para recordar y reaccionar ante invasores del pasado. Ahora, se ha descubierto el primer gen sustentador de esa larga inmunidad. (La fabricación de medicamentos específicos para ese gen podrían reforzar la resistencia a ciertas enfermedades.) Las personas carentes de un gen llamado *SAP* son inmunodeficientes y a menudo sucumben al virus de Epstein-Barr. Shane Crotty, Rafi Ahmed y sus colegas de la Universidad de Emory eliminaron ese gen en ratones. ¿Qué descubrieron? Pese a una inicial reacción normal con anticuerpos frente a un virus, los animales carentes de *SAP* no lograron producir células B, que aseguran la duración por años de los anticuerpos. Normalmente las células T estimulan el desarrollo de ambos tipos de células, pero parecen impotentes en ausencia del *SAP.*

—J. R. Minkel

Las vacunas infantiles protegen hasta la edad adulta, en parte merced a un gen memorizador de la inmunidad

CLIMATOLOGIA E HISTORIA

La sequía destructora

Muy a menudo se ha ligado la desaparición de la civilización maya a sequías catastróficas, pero las pruebas nunca han sido muy claras. Un equipo de instituciones suizas y norteamericanas ha aportado un indicio quizá más sólido. Ha estudiado el contenido del titanio presente a unos 900 metros de profundidad en los sedimentos del golfo de Cariaco. Obtuvieron datos a intervalos de sedimento de sólo 50 micrometros, un equivalente a dos meses de deposición. La temporada de lluvias de verano y otoño acumula láminas oscuras de sedimentos, ricas en titanio, mientras que la seca de invierno y primavera deja láminas claras. Los mínimos del contenido de titanio se interpretan como señales de sequía. La capacidad de resolver estación a estación año por año permite determinar con exactitud la duración y separación de las sequías. Pero, a causa de las incertidumbres del método del carbono, la datación absoluta no es tan precisa. Un mínimo del titanio en torno al 200 d.C. coincide con el abandono de las ciudades mayas, en el período preclásico. La edad de oro maya, entre el 550 y el 750 d.C., transcurrió en un intervalo temporal bastante húmedo. La civilización maya sufrió una catástrofe demográfica y se extinguió en los doscientos años siguientes. El titanio de Cariaco indica que hacia 760 empezó una época más seca. En 810 se produjo una sequía de nueve años; en 960 hubo una de tres años, muy severa, y en 910 una de seis años.

HISTORIA DE LA FISICA

Difícil convivencia

Wolfgang Pauli fue físico eminente, preclaro entre las lumbreras del siglo pasado. Lo mismo que otro genio, Dirac, era consciente de su superioridad y como tal se comportaba. Por su acerada crítica de la labor ajena se le denominó la “conciencia de la física” y él mismo solía firmar las cartas con el seudónimo de “látigo de Dios”. Su campo de interés iba más allá de la física para adentrarse en los derroteros de la epistemología y la psicología. Por su famoso “principio de exclusión” [dos electrones en un átomo no pueden tener iguales los cuatro números cuánticos] recibió el Nobel de física en 1945. Pese a que en su ayudantía fueron sucediéndose una pléyade de talentos excepcionales (Ralf Kronig, Felix Bloch, Rudolf Peierls, Hendrik Kasimir, Victor Weisskopf y Charles Enz) no parece que mantuviera con ellos una relación modélica de maestro a discípulo. Cuando Weisskopf se le presentó como nuevo ayudante, le espetó: “Sí claro, pero a quien realmente quería era a (Hans) Bethe, lo que pasa es que él trabaja en estado sólido, una línea que, aunque yo la inicié, no me gusta ahora”. Pocos días después, al mostrarle Weisskopf una elegante solución al problema que le había planteado, Pauli arrugó el entrecejo y añadió: “Con todo, hubiera escogido a Bethe”. Como cabía esperar, Pauli y Weisskopf realizaron, juntos, un extraordinario trabajo sobre partículas sin espín, un hito en la teoría cuántica de campos.



Pauli y Einstein

AARON HAUPT *Photo Researchers, Inc.* (*arriba*); CERN (*abajo*)



1. LOS TERREMOTOS DE LAS MAGNETOESTRELLAS liberan una gigantesca cantidad de energía magnética —equivalente a la energía sísmica de un terremoto terrestre de magnitud 21—. Se desprende una bola de plasma caliente, que queda atrapada en el campo magnético.



NETOESTRELLAS

Hay estrellas tan magnetizadas, que emiten gigantescas erupciones de energía y alteran la naturaleza cuántica del vacío

Chryssa Kouveliotou,
Robert C. Duncan
y Christopher Thompson

DON DIXON

El 5 de marzo de 1979, dos satélites soviéticos, los Venera 11 y 12, que unos meses antes habían dejado caer unas sondas en la tóxica atmósfera de Venus, describían su órbita elíptica por el sistema solar interior. Hasta entonces había sido una travesía sin complicaciones. Sus lecturas de radiación rondaban las 100 cuentas nominales por segundo. Pero a las 10:51 horas, hora de la costa este norteamericana, recibían un impulso de radiación gamma. En apenas una fracción de milisegundo, el nivel de radiación creció por encima de las 200.000 cuentas por segundo; acabó por salirse de la escala.

Once segundos más tarde, los rayos gamma alcanzaron a la sonda espacial de la NASA Helios 2, que también orbitaba alrededor del Sol. Era evidente que un frente de onda plano de radiación de alta energía estaba barriendo el sistema solar. Enseguida llegó a Venus y saturó el detector de la Sonda Orbital Pioneer. Unos segundos más tarde, los rayos gamma incidían en la Tierra. Inundaron los detectores de tres satélites Vela del Departamento de Defensa de Estados Unidos, del satélite soviético Prognoz 7 y del Observatorio Einstein. Finalmente, en su camino hacia el exterior del sistema solar, la onda sobrepasó el Explorador Internacional Sol-Tierra.

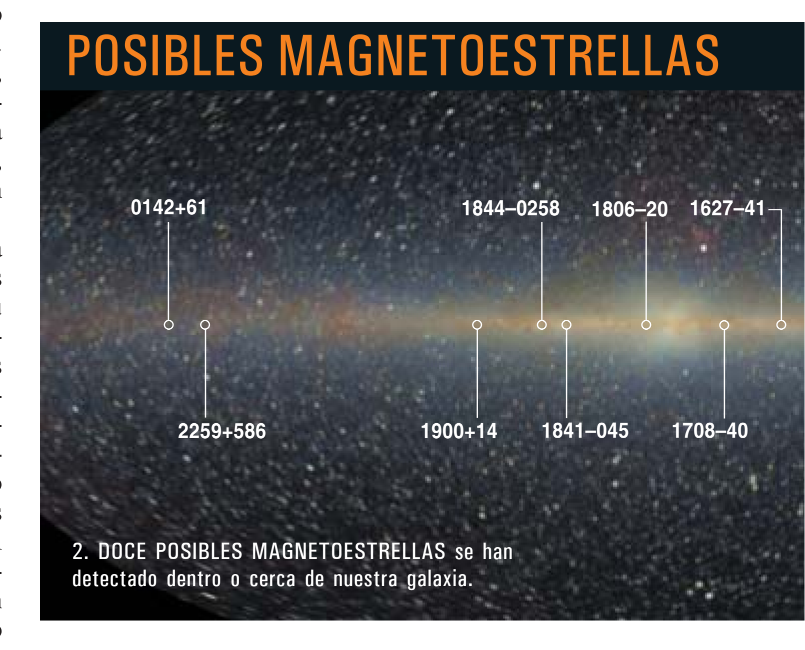
Ese impulso de rayos gamma de muy alta energía, o rayos gamma "duros", centuplicó la intensidad de cualquier erupción anterior procedente de fuera del sistema solar. Duró dos décimas de segundo. En aquel momento, nadie se percató, nada cambió en la vida bajo la atmósfera protectora de nuestro planeta. Por fortuna, todos los satélites sobrevivieron al impacto sin daños permanentes. Al pulso duro de radiación le siguieron un resplandor gamma más débil, de menor energía —rayos gamma "blandos"—, y unos rayos X que se debilitaron en los tres minutos siguientes. A medida que desaparecía, la señal osciló suavemente, con un período de ocho segundos. Catorce horas y media más tarde, a la 1:17 del 6 de marzo, pareció que otro estallido de rayos X provenía del mismo punto del cielo. Durante los cuatro años siguientes, Evgeny P. Mazets, del Instituto Ioffe de San Petersburgo, y sus colaboradores detectaron 16 destellos procedentes de la misma dirección. Aunque diferentes en intensidad entre sí, todos fueron más débiles y más cortos que la erupción del 5 de marzo.

No se ha vuelto a presenciar nada parecido. A falta de una mejor idea, al principio se catalogaron esos brotes como erupciones de rayos gamma (GRB, por su acrónimo en inglés), a pesar de lo mucho que se diferencian de ellas en múltiples aspectos. A mediados del decenio de 1980, Kevin C. Hurley, de la Universidad de California en Berkeley, observó emisiones similares en otras dos regiones del cielo. Resultaba evidente que las fuentes eran repetitivas —al contrario que las GRB, que ocurren una sola vez— [*véase* "Las explosiones más brillantes del universo", por Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2003]. En una reunión celebrada en julio de 1986 en Toulouse se estableció la localización aproximada de las tres fuentes. Las etiquetaron como "fuentes repetitivas de rayos gamma blandos"; una nueva sigla se añadía así a la larga lista de la astronomía actual: SGR (*Soft Gamma Repeater*).

Pasaron siete años más antes de que dos de nosotros (Duncan y Thompson) diésemos con una explicación de estos objetos tan peculiares. En 1998, la otra autora, Kouveliotou, y su equipo hallaron pruebas sólidas de esa explicación. Las observaciones más recientes conectan nuestra teoría a otra clase de enigma celeste, los púlsares anómalos de rayos X (AXP). Estos logros han ahondado, a su vez, nuestro conocimiento de las estrellas de neutrones.

Las estrellas de neutrones son los objetos más densos, que se sepa; encierran la masa del Sol en una bola de apenas 20 kilómetros de diámetro. El estudio de las SGR enseña que algunas estrellas de neutrones parecen poseer unos campos magnéticos tan intensos, que modifican radicalmente el material de su interior y el estado del vacío cuántico que las rodea. De ahí se siguen unos fenómenos físicos que no ocurren en ninguna otra parte del universo.

POSIBLES MAGNETOESTRELLAS



2. DOCE POSIBLES MAGNETOESTRELLAS se han detectado dentro o cerca de nuestra galaxia.

E. L. WRIGHT *Universidad de California en Los Angeles,* THE COBE PROJECT, DIRBE Y NASA

Resumen/*Las estrellas ultramagnéticas*

- Se ha observado un puñado de estrellas que experimentan erupciones de radiación gamma y rayos X millones de veces más brillantes, tal y como se las percibe en la Tierra, que cualquier otro fenómeno conocido. Las grandes cantidades de energía y las señales periódicas apuntan que el origen del fenómeno se encuentra en ciertas estrellas de neutrones.
- Esas estrellas de neutrones tienen los campos magnéticos más intensos jamás medidos, de ahí su nombre de magnetoestrellas. Inestabilidades magnéticas parecidas a los terremotos terrestres explicarían las erupciones.
- Las magnetoestrellas permanecen activas sólo durante unos 10.000 años; millones debe de haber en la galaxia que no han sido detectadas.

Un fenómeno difícil de explicar

El inmenso brillo de la erupción de marzo de 1979 hizo pensar por entonces que la fuente debía de hallarse cerca de nuestra galaxia, a unos cientos de años luz como máximo. En tal caso, la intensidad observada de rayos X y rayos gamma habría sido inferior, aunque por poco, a la luminosidad máxima que, en teoría, puede emitir una estrella de modo estable. Este umbral, calculado por el astrofísico inglés Arthur Eddington en 1926, viene fijado por la fuerza de radiación que atraviesa las calientes capas exteriores de la estrella. Si la intensidad de la radiación fuera más intensa que ese límite, superaría la fuerza de la gravedad, expulsaría material ionizado y desestabilizaría la estrella. Una emisión por debajo del límite de Eddington hubiese sido muy fácil de explicar; así, la causa de la erupción, según varios teóricos, habría sido el impacto de un pedazo de materia —un asteroide, un cometa— contra una estrella de neutrones.

Pero las observaciones pronto negarían esta hipótesis. Cada satélite artificial había grabado el tiempo de

llegada del impulso duro inicial. Con esos datos, un grupo dirigido por Thomas Lytton Cline, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de NASA, trianguló la posición de la fuente. Coincidía con la Gran Nube de Magallanes, una galaxia pequeña situada a 170.000 años luz. Más en concreto, concordaba con la del residuo brillante de una supernova reciente, que estalló hará unos 5000 años. A menos que se tratase de una mera casualidad, se había localizado la fuente a una distancia mil veces superior a la que los teóricos habían predicho. La erupción sobrepasó, pues, un millón de veces el límite de Eddington. En apenas 0,2 segundos, el episodio de marzo de 1979 desprendió tanta energía como el Sol en unos 10.000 años y la concentró en los rayos gamma, sin distribuirla a lo largo del espectro electromagnético.

Ninguna estrella común puede liberar tanta energía. La fuente tenía que ser algo fuera de lo normal: o un agujero negro, o una estrella de neutrones. Descartaba lo primero una modulación de ocho segundos: un agujero negro es un objeto carente de estructuras que puedan generar impulsos regulares. La asociación con un resto de supernova fortalecía aún más la hipótesis de la estrella de neutrones. Se crea una cuando el interior de una estrella común de gran masa agota su combustible nuclear, se hunde repentinamente bajo su propio peso y se desencadena una explosión de supernova.

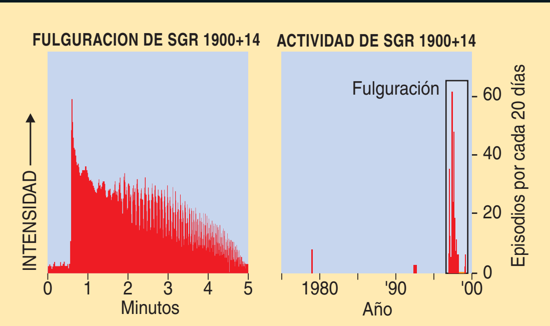
Identificar la fuente del estallido como una estrella de neutrones no resolvió el enigma; al contrario, contribuyó a aumentar el misterio. Se conocen estrellas de neutrones que se hallan inmersas en los restos dejados por una supernova: los radiopúlsares, objetos que se encienden y apagan en la parte del espectro correspondiente a las ondas de radio. Sin embargo, la erupción de marzo de 1979, con una rotación aparente de ocho segundos, giraba mucho más despacio que cualquier púlsar conocido por aquel entonces. Incluso cuando no experimentaba una erupción, el objeto asociado emitía una cantidad constante de rayos X superior a la que explicaría la rotación de una estrella de neutrones. Además, estaba desplazado del centro de los remanentes de la supernova. Si se originó en el centro, como es probable, tendría que haber adquirido una velocidad de unos 1000 kilómetros por segundo en el momento de su nacimiento. Se pensaba que era improbable que una estrella de neutrones tomase tan elevada velocidad.

Finalmente, las propias erupciones parecían inexplicables. Se habían detectado destellos de rayos X en otras estrellas de neutrones, pero nunca excedían en mucho el límite de Eddington. Se atribuía su generación a la fusión termonuclear de hidrógeno o helio, o a una incorporación repentina de material a la superficie de la estrella. Pero el brillo de las SGR no tenía precedentes. Parecía que se necesitaban nuevos mecanismos físicos para explicarlas.



NOMBRE	AÑO DEL DESCUBRIMIENTO	PERIODO DE ROTACION (segundos)
SGR 0526–66	1979	8,0
SGR 1900+14	1979	5,16
SGR 1806–20	1979	7,47
SGR 1801–23*	1997	?
SGR 1627–41	1998	?
AXP 1E 2259+586	1981	6,98
AXP 1E 1048–59†	1985	6,45
AXP 4U 0142+61	1993	8,69
AXP 1RXS 1708–40†	1997	11,0
AXP 1E 1841–045	1997	11,8
AXP AXJ1844–0258	1998	6,97
AXP CXJ0110–7211†	2002	5,44

* No se muestra en el mapa; su localización es bastante imprecisa
† Nombre abreviado



3. LA GIGANTESCA FULGURACION DE RAYOS X de agosto de 1998 confirmó la existencia de las magnetoestrellas. Empezó con una punta de radiación que apenas duró un segundo (*izquierda*). Vino a continuación un tren de impulsos con un período de 5,16 segundos. Este episodio fue el brote más poderoso que se haya observado en el objeto SGR 1900 + 14 desde su descubrimiento en 1979 (*derecha*).

FUENTE DE LA TABLA: CHRYSSA KOUVELIOTOU, ROBERT C. DUNCAN Y CHRISTOPHER THOMPSON

El frenado de la rotación

La última erupción de la fuente de marzo de 1979 ocurrió en mayo de 1983; han pasado 20 años sin que suceda nada. Otras dos SGR, ambas dentro de nuestra Vía Láctea, empezaron a emitir en 1979; han permanecido activas, con cientos de erupciones, desde entonces. Se localizó una cuarta SGR en 1998. Tres de estos cuatro objetos muestran una posible asociación, que no está probada, con restos de supernovas recientes. Dos se hallan además cerca de cúmulos muy densos de estrellas jóvenes y de mucha masa; podría indicar que las SGR tienden a originarse en esas estrellas. Una quinta posible SGR sólo ha exhibido dos erupciones y todavía se desconoce su localización precisa.

Tal y como señalaron en 1996 Baolian L. Cheng, Richard I. Epstein, Robert A. Guyer y C. Alex Young,

del Laboratorio Nacional de Los Alamos, las estadísticas de las SGR recuerdan mucho a las de los terremotos terrestres. Las energías presentan distribuciones matemáticas muy similares; los sucesos menos energéticos son los más comunes. Nuestro doctorando Ersin Gögüs, de la Universidad de Alabama en Huntsville, comprobó con una muestra grande de erupciones de varias fuentes que así era. Esta y otras propiedades estadísticas caracterizan a la criticidad autoorganizada, fenómeno en que un sistema compuesto alcanza un estado crítico tal, que una pequeña perturbación provoca una reacción en cadena. Se da en sistemas tan dispares como los aludes y las fulguraciones magnéticas del Sol.

Pero, ¿cuál podría ser la razón de que una estrella de neutrones se halle en esas circunstancias? Se encontró la respuesta en otra línea de investigación, la de los radiopúlsares. Los púlsares son estrellas de neutrones magnetizadas, de rápida rotación alrededor de su eje. El campo magnético, generado por las corrientes eléctricas del interior del astro, gira con éste. De los polos magnéticos manan haces de ondas de radio; barren el espacio a medida que rota la estrella, como las luces de los faros —de ahí que se observe una pulsación—. Los púlsares también desprenden vientos de partículas cargadas y ondas electromagnéticas de baja frecuencia, que se llevan parte del momento angular; la rotación se va frenando paulatinamente.

Quizás el púlsar más conocido sea el de la Nebulosa del Cangrejo, residuo de una explosión de supernova observada en el año 1054. El púlsar gira una vez cada 33 milisegundos. Hoy se está frenando a un ritmo de 1,3 milisegundos por siglo. La extrapolación arroja que al nacer debía de girar alrededor de sí mismo una vez cada 20 milisegundos. Se cree que seguirá frenándose; llegará un momento en que su rotación será demasiado lenta para generar los impulsos de radio. Se ha medido el ritmo de frenado de casi todos los púlsares. Según la teoría, depende de la intensidad del campo magnético de la estrella; en consecuencia, se deduce que la mayoría de los radiopúlsares jóvenes tienen campos magnéticos de entre 10^{12} y 10^{13} gauss. Por comparar: un imán para adherir adornos a la nevera tiene una intensidad de 100 gauss.

Un horno de convección excepcional

Así las cosas, queda abierta una pregunta fundamental: ¿cómo se originó ese campo magnético? Se suponía, por lo común, que el campo era como era porque fue como fue; la mayoría pensaba que el campo magnético del púlsar era una reliquia del que tuvo la

DOS TIPOS DE ESTRELLAS DE NEUTRONES

1 Se cree que la mayoría de las estrellas de neutrones provienen de estrellas, aunque comunes, de masa muy grande, entre ocho y veinte veces mayor que la del Sol.

2 Las estrellas de gran masa mueren en una explosión de supernova de clase II: el núcleo estelar colapsa y forma una densa bola de partículas subatómicas.

ESTRELLA DE NEUTRONES RECIENTE

MAGNETOESTRELLA

PULSAR COMUN

3 A: Cuando la nueva estrella de neutrones gira muy rápido, se genera un intenso campo magnético. Las líneas de campo se distorsionan dentro de la estrella.



4 A: La magnetoestrella se estructura en capas bien definidas, con las líneas del campo distorsionadas en el interior y limpias en el exterior. Podría emitir un haz estrecho de ondas de radio.



5 A: Una magnetoestrella vieja se ha enfriado; gran parte de su magnetismo ha desaparecido. Emite muy poca energía.



3 B: Cuando la nueva estrella de neutrones gira lentamente, su campo magnético, aunque fuerte conforme a una vara de medir ordinaria, no alcanza valores magnetoestelares.



4 B: Un púlsar maduro es más frío que una magnetoestrella de la misma edad. Emite intensamente en radioondas; los radiotelescopios los descubren con facilidad.



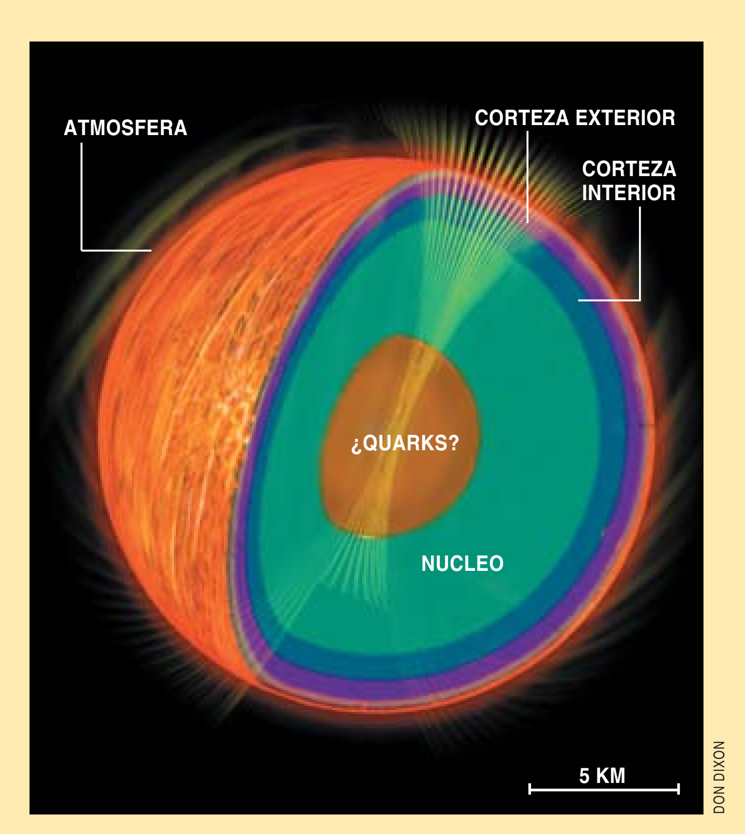
5 B: Un púlsar viejo se ha enfriado; no emite ya radioondas.



estrella antes de convertirse en una supernova. Todas las estrellas tienen un campo magnético débil. Basta con que se compriman para que aumente. De acuerdo con las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, cuando un objeto magnetizado reduce su tamaño a la mitad su campo magnético se cuadriplica. El núcleo de una estrella de masa grande se comprime 10^5 veces desde su nacimiento hasta convertirse en una estrella de neutrones; su campo magnético se intensifica, por tanto, 10^{10} veces.

Si el campo magnético del núcleo estelar tuviese suficiente intensidad desde un principio, la compresión podría explicar el magnetismo de los púlsares. Desgraciadamente, no cabe medir el campo magnético en las profundidades de una estrella; no puede comprobarse esta hipótesis tan sencilla. Por otra parte, hay razones para pensar que la compresión es sólo una parte del proceso.

Dentro de una estrella, el gas circula por convección. Ascienden masas calientes de gas ionizado, descienden masas frías. El gas ionizado conduce bien la electricidad; en su movimiento, arrastra consigo las líneas de campo magnético. Como consecuencia, el campo se remodela y, en ocasiones, se amplifica. Se cree que este fenómeno, la "acción de dinamo", genera los campos magnéticos de estrellas y planetas. La dinamo funciona en cada fase de la vida de una estrella grande,



4. LA ESTRUCTURA DE UNA ESTRELLA DE NEUTRONES se infiere de las teorías sobre la materia nuclear. La corteza, un entramado de núcleos atómicos y electrones, puede sufrir seísmos. El núcleo se compone sobre todo de neutrones y quizá quarks. Una atmósfera de plasma caliente de unos pocos centímetros de espesor podría recubrir el conjunto.

Los autores

CHRYSSA KOUVELIOTOU, ROBERT C. DUNCAN y CHRISTOPHER THOMPSON colaboran desde hace 5 años en el estudio de las magnetoestrellas. Kouveliotou, dedicada a la observación, trabaja en el Centro Nacional de Ciencias Espaciales y Tecnológicas, en Huntsville. Duncan y Thompson son teóricos, el primero de la Universidad de Texas en Austin, el segundo del Instituto Canadiense de Astrofísica Teórica en Toronto.

siempre y cuando su núcleo turbulento rote con suficiente rapidez. Durante un breve período de tiempo tras la formación de una estrella de neutrones, la convección es especialmente violenta.

Adam Burrows, de la Universidad de Arizona, y James M. Latimer, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, descubrieron el fenómeno en 1986 gracias a unas simulaciones por ordenador. Encontraron que las temperaturas de una estrella de neutrones recién formada sobrepasan los 30 millones de kelvin. El caliente fluido nuclear circula en 10 milisegundos o menos; transporta una enorme cantidad de energía cinética. Pasados unos 10 segundos, la convección cesa.

Poco después de que Burrows y Latimer realizaran sus primeras simulaciones, Duncan y Thompson, entonces en la Universidad de Princeton, calcularon el efecto de esta convección violenta en el magnetismo de una estrella de neutrones. Tomemos el Sol, que experimenta una versión más suave del mismo proceso, como punto de referencia. A medida que el fluido solar circula, arrastra consigo las líneas magnéticas y cede un 10 por ciento de su energía cinética al campo. Si el fluido de una estrella de neutrones recién formada también cediera un décimo de su energía cinética al campo magnético, éste llegaría a superar los 10^{15} gauss, intensidad mil veces superior a los campos de la mayoría de los radiopúlsares.

La dinamo operará globalmente (y no sólo en ciertas regiones) dependiendo de que el ritmo de rotación de la estrella sea comparable al ritmo de convección. Dentro del Sol, rotación y convección se asemejan; el campo magnético solar se organiza, pues, a grandes escalas. De la misma forma, una estrella de neutrones que se forme con una rotación tanto o más rápida que el período de convección de 10 milisegundos generará un fortísimo macrocampo magnético que abarcará el astro entero. En 1992 bautizamos a estas hipotéticas estrellas de neutrones con el nombre de "magnetoestrellas".

El límite superior para el magnetismo de una estrella de neutrones es de 10^{17} gauss; más allá de este valor, el fluido interior tendería a mezclarse y el campo se disiparía. No se conocen en todo el universo objetos que generen y mantengan campos tan intensos. De nuestros cálculos se deriva que los radiopúlsares son estrellas de neutrones en las que no actúa la dinamo de gran escala. En el caso del púlsar del Cangrejo, la estrella de neutrones rotaba recién formada una vez

cada 20 milisegundos, mucho más despacio que la convección; la dinamo no arrancó nunca.

Inmensos campos magnéticos

Aunque no desarrollamos el concepto de magnetoestrella para explicar las fuentes de rayos gamma blandos, pronto vimos muy clara su pertinencia al respecto. El campo magnético actúa como un intenso freno de la rotación de la magnetoestrella. En unos 5000 años, un campo de 10^{15} gauss frenaría la rotación de forma que la estrella giraría sólo una vez cada ocho segundos; quedarían explicadas así las oscilaciones observadas durante el estallido de marzo de 1979.

A medida que el campo evoluciona, se reconfigura y con sus líneas de campo arrastra las corrientes eléctricas hasta el exterior de la estrella. Estas corrientes, a su vez, generan rayos X. Mientras tanto, el campo magnético se desplaza por la corteza sólida de la magnetoestrella doblándola y estirándola. Este proceso calienta el interior de la estrella. En ocasiones, en un poderoso terremoto estelar, rompe la corteza. Se libera una gran cantidad de energía magnética, que crea una nube de electrones y positrones, así como una erupción de rayos gamma blandos; así se explican las erupciones más débiles a las que las SGR deben su nombre.

Más raramente, el campo magnético se desestabiliza y reorganiza a gran escala. Parecidas perturbaciones, aunque menores, ocurren en el Sol y generan las fulguraciones solares. Una magnetoestrella tiene la energía suficiente para encender una fulguración gigante como la observada en marzo de 1979. La teoría predice que el primer medio segundo de esa tremenda emanación provino de la expansión de una bola de fuego. En 1995 propusimos que parte de esa bola de fuego quedó atrapada en las líneas del campo magnético cerca de la estrella. Esa bola atrapada colapsó y se evaporó, emitiendo rayos X mientras tanto. Calculamos, a partir de la cantidad de energía desprendida, la intensidad del campo magnético requerida para confinar esta enorme bola de fuego: más de 10^{14} gauss, en concordancia con la intensidad del campo inferida del ritmo de frenado.

Bohdan Paczynski, de Princeton, ofreció otra evaluación del campo en 1992. Los rayos X escapan de una nube de electrones más fácilmente si las partículas cargadas están inmersas en un intenso campo magnético. Para mantener el brillo de rayos X durante la erupción el campo magnético debía también superar los 10^{14} gauss.

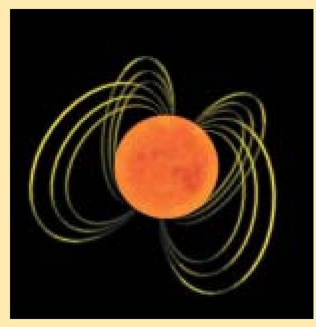
Pero, con esas magnitudes, la teoría se complica. Sobrepasan el umbral que traza la electrodinámica cuántica en torno a los 4×10^{13} gauss. Más allá de esa cota ocurren fenómenos peculiares. Los fotones de rayos X se separan en dos, o se funden en uno. El vacío mismo se polariza y vuelve birrefringente, como un cristal de calcita. Los átomos se deforman, se convierten en cilindros alargados más delgados que la longitud de onda relativista de un electrón (*véase el recuadro* "Magnetismo extremo"). Todos estos fenómenos extraños causan efectos observables en las magnetoestrellas. La rareza de estos fenómenos físicos atrajo en su momento a pocos.

Nuevos baños de radiación

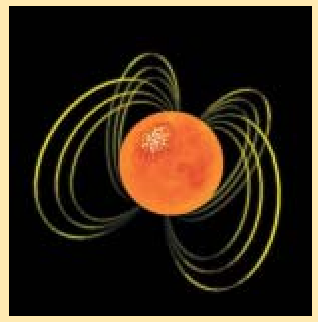
Al mismo tiempo que iban saliendo poco a poco estos desarrollos teóricos a la luz, los observadores seguían buscando las fuentes de las erupciones. La primera oportunidad se tuvo una tarde de octubre de 1993 en que el Observatorio Compton de rayos gamma, de la NASA, detectó una erupción. Era el momento que Kouveliotou esperaba cuando se unió al equipo del Compton en Huntsville. El instrumento que registró la erupción la situó dentro de una pequeña porción de

¿COMO SE GENERAN LAS ERUPCIONES DE LAS MAGNETOESTRELLAS?

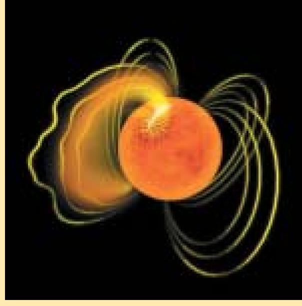
EL CAMPO MAGNÉTICO DE LA ESTRELLA es tan intenso que la corteza rígida se resquebraja; se libera entonces una cantidad ingente de energía.



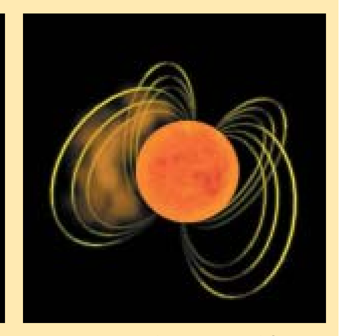
1 Durante la mayor parte del tiempo, la magnetoestrella permanece inactiva. Pero las tensiones de origen magnético se van acumulando lentamente.



2 Llega un momento en que la corteza sólida sufre más tensiones que las que puede aguantar. Se fractura, probablemente en muchos pedazos pequeños.



3 Este "terremoto" estelar origina una corriente eléctrica ascendente, que decae y deja tras de sí una bola de fuego.



4 La bola de fuego se enfría al emitir rayos X desde su superficie. Se evapora en unos minutos, como mucho.

DON DIXON

cielo. Kouveliotou solicitó la ayuda del satélite japonés ASCA. Toshio Murakami, del Instituto de Ciencias del Espacio y Astronáutica de Japón, y sus colaboradores hallaron una fuente de rayos X en esa misma región. La fuente se mantuvo estable, pero luego experimentó otra erupción; más allá de toda duda, era una SGR. Ese mismo objeto se había visto antes, en 1979, y se le había asignado el nombre de SGR 1806-20, según sus coordenadas celestes aproximadas. Ahora se precisaba mejor su posición y se lo observaba en todo el espectro electromagnético.

El siguiente avance ocurrió en 1995, cuando la NASA lanzó el Explorador Rossi de Rayos X (RXTE), satélite sensible a pequeñas variaciones en la intensidad de los rayos X. Con este instrumento, Kouveliotou descubrió que la emisión de SGR 1806-20 oscilaba con un período de 7,47 segundos, muy cerca, resultaba asombroso, de la periodicidad de ocho segundos medida en la erupción de marzo de 1979 (SGR 0526-66). En el transcurso de cinco años, la SGR se había frenado en dos partes entre mil. Parecerá un frenado lento, pero no hay radiopúlsar que se frene tan deprisa; actúan, pues, campos magnéticos de casi 10^{15} gauss.

Para contrastar más a fondo la hipótesis magnetoestelar se requería un segundo destello gigantesco. Por suerte, los cielos fueron benévolos. La mañana del 27 de agosto de 1998, unos 19 años después de la erupción con que empezó la astronomía de las SGR, una segunda onda de rayos gamma y rayos X aún más fuerte, procedente del espacio, alcanzaba la Tierra. Saturó los detectores de siete instrumentos a bordo de satélites. Hubo que desactivar, para su protección, la sonda interplanetaria de la NASA "Encuentro con un cometa, aproximación a un asteroide". Los rayos gamma golpearon la parte nocturna de la Tierra. La fuente se hallaba en el zenit sobre el Pacífico central.

Gracias al azar, el ingeniero Umran S. Inan y sus colaboradores de la Universidad de Stanford se encontraban a primeras horas de la mañana reuniendo datos sobre la propagación de ondas de radio de muy baja frecuencia alrededor de la Tierra. A las 3:22 horas, hora de la costa oeste norteamericana, observaron un cambio brusco en las capas altas ionizadas de la atmósfera. El borde interior de la ionosfera cayó de los 85 a los 60 kilómetros durante cinco minutos. Fue asombroso. Ese efecto tuvo en nuestro planeta una estrella de neutrones de una parte lejana de nuestra galaxia, a unos 20.000 años luz de distancia.

Otra maravilla magnética

La fulguración del 27 de agosto fue casi una copia exacta de la erupción de marzo de 1979. En sí, brilló sólo la décima parte que aquélla, pero al estar la fuente más cerca de la Tierra se convirtió en la erupción de rayos gamma más intensa jamás detectada fuera del sistema solar. En los últimos cientos de segundos de la fulguración se observó una pulsación clara, con un período de 5,16 segundos. Kouveliotou y sus colaboradores han medido el frenado de la estrella con el RXTE. No cabe duda de que la rotación alrededor de sí misma de la fuente se lentifica a un ritmo comparable al de SGR 1806-20; ha de contar con un campo magnético de intensidad similar. Se trata, pues, de una SGR más.

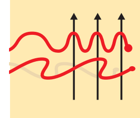
Gracias a las localizaciones precisas que los rayos X facilitan de las SGR, se las ha estudiado con radiotelescopios y telescopios infrarrojos (aunque no en luz visible, bloqueada por el polvo interestelar). Muchos astrónomos han participado en esta nueva tarea, entre los que destacan Dale Frail, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, y Shri Kulkarni, del Instituto de Tecnología de California (Caltech). Otras observaciones muestran que las cuatro SGR confirmadas continúan emitiendo energía, aunque más débilmente, entre estallido y estallido. "Más débilmente" es sólo una expresión relativa: ese resplandor en rayos X decuplica, centuplica incluso, la radiación visible del Sol.

En estos momentos, se puede decir ya que los campos magnéticos de las magnetoestrellas están mejor medidos que los campos de los púlsares. La única prueba de que los púlsares aislados poseen campos magnéticos de 10^{12} gauss la proporciona el frenado de su rotación. Por el contrario, la combinación de un rápido frenado con un brillo en rayos X muy intenso facilita una diversidad de argumentos que indican la existencia de campos de 10^{14} y 10^{15} gauss en las magnetoestrellas. Mientras se cerraba el presente artículo, Alaa Abrahim, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, y sus colaboradores han informado de otro tipo de indicio que apunta a la presencia de esos campos tan intensos en las magnetoestrellas: unas líneas espectrales de rayos X que parecen generadas por protones que rotan en campos de 10^{15} gauss.

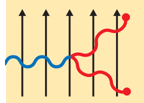
¿Guardan alguna relación las magnetoestrellas con otros fenómenos cósmicos, aparte de las SGR? Aún

MAGNETISMO EXTREMO

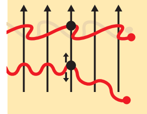
LOS CAMPOS de una magnetoestrella alteran profundamente la radiación y la materia.



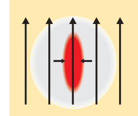
BIRREFRINGENCIA DEL VACIO
Las ondas de luz polarizada (*rojo*) cambian su velocidad y, por tanto, su longitud de onda cuando entran en un campo magnético muy intenso (*líneas negras*).



ROTURA DEL FOTON
Los rayos X se dividen, en un fenómeno relacionado con el anterior, en dos o se funden unos con otros. Este proceso es importante si los campos superan los 10^{14} gauss.



ELIMINACION DE LA DISPERSION
Una onda de luz puede pasar junto a un electrón (*círculo negro*) con muy poca oposición si el campo impide que el electrón vibre con la onda.



DISTORSION DE LOS ATOMOS
Los campos de más de 10^9 gauss distorsionan los orbitales de los electrones hasta darles forma de puros. En un campo de 10^{14} gauss, el átomo de hidrógeno es unas 200 veces más estrecho.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

quedan por explicar las erupciones de rayos gamma más breves, algunas de las cuales podrían ser fulguraciones de magnetoestrellas de otras galaxias. Si la observan a gran distancia, a los telescopios les costará detectar incluso una fulguración muy brillante. Sólo captarán el impulso breve e intenso de rayos gamma que se emite al principio de la fulguración; registrarán el fenómeno, pues, como una GRB.

Thompson y Duncan plantearon a mediados del decenio de 1990 que las magnetoestrellas quizás explicaban también los púlsares anómalos de rayos X (AXP), clase de objetos que se asemejan a las SGR en muchos aspectos. La única dificultad que presentaba esta idea era que nunca se ha observado una erupción procedente de un AXP. Sin embargo, hace muy poco, Victoria M. Kaspi y Fotis P. Gavriil, de la Universidad McGill, y Peter M. Woods, del Centro Nacional para el Espacio y la Tecnología de Huntsville, han captado erupciones en dos de los siete AXP conocidos. Uno de esos dos está asociado a los restos de una supernova de la constelación de Casiopea.

El primer objeto detectado en luz visible que pudiera ser una magnetoestrella se halla precisamente en Casiopea. Ferdi Hulleman y Marten van Kerkwijk, de la Universidad de Utrecht, en colaboración con Kulkarni, lo observaron hace tres años; desde entonces, han ido siguiendo su brillo óptico Brian Kern y Christopher Martin, del Caltech. Pese a lo débil que es la imagen, han comprobado que la luz visible de este púlsar anómalo se apaga y se enciende al mismo paso que los rayos X de la estrella de neutrones. Parece reforzar la hipótesis de que se trata de una magnetoestrella. La otra posibilidad —que los AXP consistan en estrellas de neutrones normales rodeadas de un disco de polvo— predice un brillo mucho mayor en el visible y en el infrarrojo, y una oscilación menor que la vista.

A la luz de estos recientes descubrimientos y dado el aparente silencio de la fuente de la Gran Nube de Magallanes durante 20 años, da la impresión de que las magnetoestrellas mutan. Pueden permanecer silentes durante años, incluso décadas, para luego conocer períodos de gran actividad. Algunos creen que los AXP son más jóvenes, en promedio, que las SGR; se trata, en todo caso, de un debate abierto. Si ambos tipos de fenómenos se debiesen a las magnetoestrellas, éstas constituirían una facción muy considerable de las estrellas de neutrones.

Las magnetoestrellas nos recuerdan cuánto tenemos aún que aprender acerca del universo. Entre innumerables astros, apenas si hemos identificado una docena de ellas. Se manifiestan durante una fracción de segundo, en una luz que sólo los telescopios más refinados pueden apreciar. En unos 10.000 años, sus campos magnéticos se congelan y dejan de emitir rayos X brillantes. Por tanto, esa docena de magnetoestrellas significa la existencia de más de un millón, quizás alrededor de 100 millones, de viejas magnetoestrellas que se oscurecieron hace tiempo. Apagados, muertos, esos mundos extraños vagan por el espacio interestelar. ¿Qué otros fenómenos, tan peculiares y efímeros, no se nos estarán escapando?

Bibliografía complementaria

FORMATION OF VERY STRONGLY MAGNETIZED NEUTRON STARS: IMPLICATIONS FOR GAMMA-RAY BURSTS. Robert C. Duncan y Christopher Thompson en *Astronomical Journal*, vol. 392, n.º 1, págs. L9-L13; 10 de junio de 1992.

AN X-RAY PULSAR WITH A SUPERSTRONG MAGNETIC FIELD IN THE SOFT GAMMA-RAY REPEATER SGR 1806-20. C. Kouveliotou, S. Dieters, T. Strohmayer, J. Von Paradijs, G. J. Fishman, C. A. Meegan, K. Hurley, J. Kommers, I. Smith, D. Frail y T. Murakami en *Nature*, vol. 393, págs. 235-237; 21 de mayo de 1998.

THE LIFE OF A NEUTRON STAR. Joshua N. Winn en *Sky & Telescope*, vol. 98, n.º 1, págs. 30-38; julio de 1999.

PHYSICS IN ULTRA-STRONG MAGNETIC FIELDS. Robert C. Duncan. Fifth Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, 23 de febrero de 2002.

FLASH! THE HUNT FOR THE BIGGEST EXPLOSIONS IN THE UNIVERSE. Govert Schilling. Cambridge University Press, 2002.



Neurobiología del suicidio

¿Por qué algunas personas deciden quitarse la vida? La investigación reciente busca una explicación en los mecanismos químicos que van asociados en el cerebro a esta opción

Carol Ezzell

En 1994, dos días después de regresar de unas felices vacaciones familiares, mi madre, de 57 años de edad, se encañonó una pistola contra el pecho izquierdo. La bala le perforó el corazón y partió los de toda la familia.

Ocurrió hacia la medianoche de un sábado del mes de julio, época del año en la que más abundan los suicidios en el hemisferio norte, como, para mi sorpresa, sabría después. Mi padrastro estaba en casa, pero no oyó el único disparo porque en aquellos momentos se duchaba en el otro extremo del piso. Cuando volvió al dormitorio, halló que su mujer yacía sobre la alfombra, agonizando. Antes de morir, mi madre intentó decirle alguna cosa, pero él no pudo entender qué. Los servicios médicos de urgencia hubieron de atender a un paciente distinto del que esperaban: mi padrastro, que casi se muere aquella noche. La impresión le hizo hiperventilar y sus pulmones, ya afectados de enfisema, no lo soportaron.

Mientras sucedía todo esto, dormía en mi apartamento, a 300 kilómetros de distancia. A las dos de la madrugada me despertó el portero por teléfono diciéndome que mi cuñada esperaba abajo y quería subir. Lo primero que le dije, nada más abrir la puerta, fue: "Es mi madre, ¿no?"

Son muchas las familias que, como la mía, sufren la terrible pena de que se les haya suicidado algún ser querido: en los EE.UU. se quitan cada año la vida 30.000 personas, más o menos la mitad de cuantas murieron el año pasado a causa del sida. ¿Por qué se matan?

Mi madre padecía una enfermedad mental, como la mayor parte (se calcula que entre el 60 % y el 90 %) de

MATT MAHURIN

EL SUICIDIO EN EE.UU.

El suicidio es, en los EE.UU., **la 11ª causa de muerte**: a él se debe el 1,2 % del total de decesos.

Cada 18 minutos se suicida una persona en los EE.UU.; cada minuto intenta alguien suicidarse.

Hay cuatro veces más hombres que se suiciden que mujeres, pero el número de **mujeres que intentan suicidarse** es, por lo menos, el doble del de hombres.

Cada día se quitan la vida unos **80 estadounidenses**.

La cantidad de **varones blancos** que se suicidan a una edad comprendida **entre los 15 y los 24 años** se ha triplicado desde 1950.

Entre 1980 y 1996 la cantidad de **varones afroamericanos de 15 a 19 años** de edad que se suicidaron aumentó un 105%.

El suicidio es la **tercera causa de muerte de los adolescentes** estadounidenses de entre 10 y 19 años de edad.

los suicidas estadounidenses. Era, en su caso, la psicosis maniacodepresiva, también llamada trastorno bipolar. A no ser que se mediquen debidamente —y respondan bien a la medicación— los maniacodepresivos oscilan entre fases de desespero y fases de exultación o agitación. La mayoría de quienes se quitan la vida tienen un historial de depresiones o de psicosis maniacodepresiva, pero las personas con depresión grave difieren entre sí en cuanto a su propensión al suicidio.

Se van descubriendo indicios en el comportamiento de la propensión al suicidio. Se investigan también las diferencias anatómicas y químicas que pueda haber entre los cerebros de los suicidas y los de quienes mueren por otras causas. Si se pudiera descubrirlas mediante tomografías cerebrales o análisis de sangre, los médicos distinguirían algún día a quienes encerrasen en sí una tendencia a suicidarse; se hallarían entonces en condiciones de intentar que no se produjese la tragedia. La meta no está todavía a la vista: muchos de quienes padecen tendencias suicidas acaban por quitarse la vida aunque se haya tratado de evitarlo por todos los medios.

El legado de mi madre

Sólo una cosa me es más difícil de sobrellevar que la ignorancia en que vivo de qué llevó a mi madre a su desesperada acción: haber caído en la cuenta de que jamás sabré con seguridad la respuesta.

En el futuro, quizá se aclaren algunos aspectos del historial de mi madre; ahora se están investigando cuestiones así. Una antigua duda, la de si la tendencia al suicidio es innata o la consecuencia de un cúmulo de malas experiencias, va estando ya, al menos, más cerca de despejarse.

Aunque en algunos círculos psiquiátricos prosigue aún el debate que contrapone herencia y ambiente, la mayoría de quienes estudian el suicidio sostienen una tesis intermedia. "Por fuerza han de ser varias cosas las que vayan mal a la vez", explica Victoria Arango, del Instituto Psiquiátrico del Estado de Nueva York, asociado al Centro Médico Presbiteriano de Columbia. "No digo que el suicidio se deba a algo puramente biológico; sólo, que comienza en un riesgo biológico subyacente." La experiencia de la vida, el estrés agudo y los factores psicológicos desempeñan su parte, afirma. En la raíz del enigma del suicidio se encuentra, con todo, un sistema nervioso cuyas líneas de comunicación han llegado a enredarse hasta el punto de formar una maraña de nudos insoportablemente dolorosos.

Arango encabeza, con su compañero de la Universidad de Columbia J. John Mann, el esfuerzo por discernir esos nudos y poner en claro la neuropatología del suicidio. Han reunido especímenes de cerebros de víctimas del suicidio; se suele reconocer que su colección es la mejor de Estados Unidos. Doscientos guardan las 25 cámaras frigoríficas de sus laboratorios. Los examinan en busca de alteraciones neuroanatómicas, químicas o genéticas que quizá sólo puedan darse en los sujetos proclives a quitarse la vida. Junto a cada cerebro puede verse una "autopsia psicológica", esto es, un compendio de las entrevistas mantenidas con los familiares y amigos del suicida en las que se inquirió cuál era su estado mental y cómo se portó hasta llegar a su última acción. "Tratamos de obtener un cuadro completo", dice Mann, "y de hacernos una idea lo más compleja posible de aquella persona." Cada cerebro de suicida se compara con el cerebro-control de un sujeto del mismo sexo, que no padeció ningún trastorno psiquiátrico y murió aproximadamente a la misma edad por otra causa.

Arango y Mann centran parte de sus investigaciones en la corteza prefrontal, la porción del cerebro tras el hueso frontal. La corteza prefrontal es la sede de las funciones ejecutivas del cerebro, entre ellas la censura interna que evita que digamos de buenas a primeras lo que realmente pensamos en situaciones sociales embarazosas o que actuemos dejándonos llevar de impulsos que podrían ser peligrosos.

Este papel de la corteza prefrontal de amortiguar los impulsos tiene especial interés para Mann y Arango. Durante mucho tiempo se ha con-

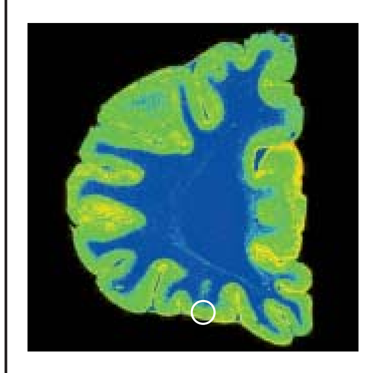
CLAVES FISICAS DEL SUICIDIO

CAMBIOS EN LA CORTEZA PREFRONTAL ORBITAL

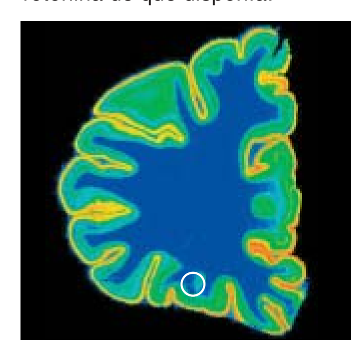
Los cortes micrométricos del cerebro de un suicida contienen menos neuronas en cierta subsección (*la marcada con un círculo*) de la corteza prefrontal orbital.



Por toda la corteza, los portadores de serotonina (*en amarillo*) absorben serotonina. En la subsección marcada, es pequeño el número de esos portadores.

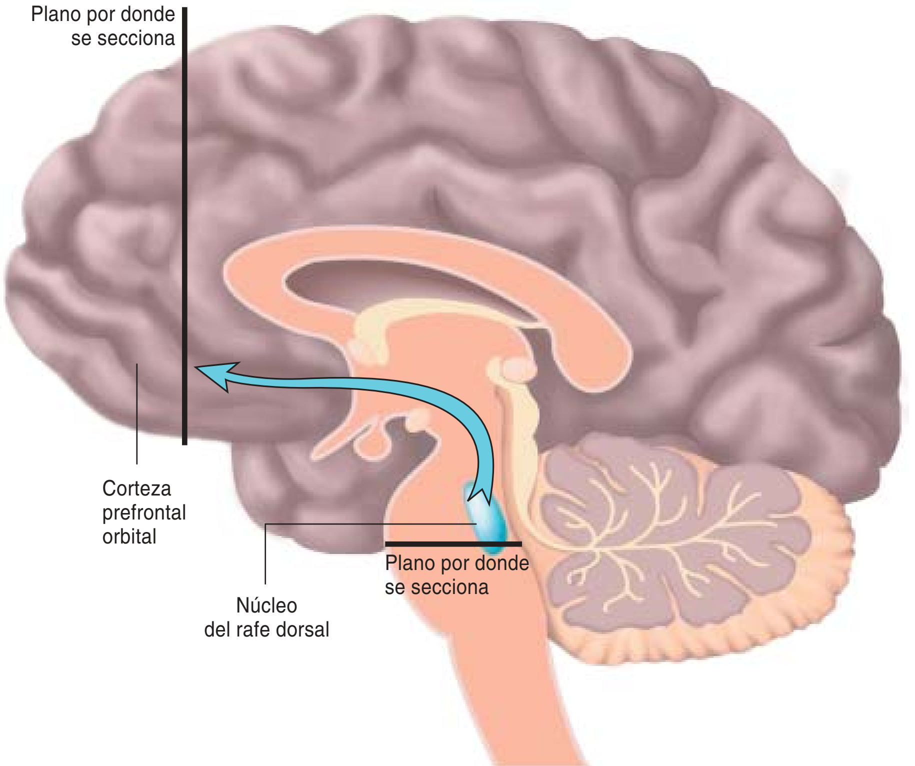


El área analizada muestra también que se enlaza más serotonina (*color naranja)* por neurona. El conjunto de los análisis indica que el cerebro trató de aprovechar al máximo la serotonina de que disponía.



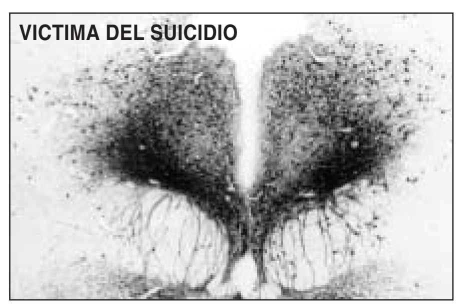
EN LAS PERSONAS QUE SE QUITAN LA VIDA ocurren cambios anatómicos y químicos en dos regiones del cerebro: la corteza prefrontal orbital, que está justo encima de los ojos, y el núcleo del rafe dorsal del tronco cerebral. Las alteraciones evidencian una reducción de la capacidad de producir y usar la serotonina, importantísimo neurotransmisor que se sabe escasea en los cerebros de los impulsivos y los depresivos. Las neuronas del núcleo del rafe dorsal producen serotonina; tienen largas proyecciones (*flecha azul)* que el neurotransmisor transporta hasta la corteza prefrontal orbital. En las víctimas de suicidio, el núcleo del rafe dorsal envía a la corteza prefrontal orbital cantidades de serotonina menores que las normales.

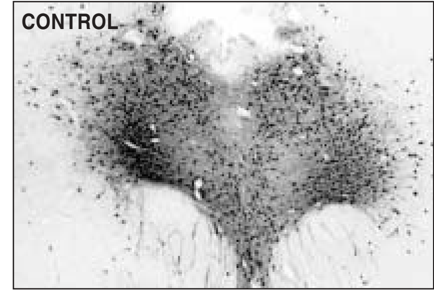




CAMBIOS EN EL NUCLEO DEL RAFE DORSAL

Las neuronas del núcleo del rafe dorsal del tronco cerebral de un suicida contienen, por lo general, más cantidad de la enzima sintetizadora de la serotonina (*moteado oscuro)* que la correspondiente región cerebral de alguien que muriese de otro modo. Esta diferencia indica que los cerebros de los suicidas intentan producir más serotonina.





VICTORIA ARANGO *et al.* Instituto Psiquiátrico del Estado de Nueva York (*cortes cerebrales micrométricos*); reproducidas con permiso de *BIOLOGICAL PSYCHIATRY*, vol. 46, n.º 4; 1999 (*micrografías de neuronas*); CLEO VILETT (*diagrama cerebral*)

En Estados Unidos, el porcentaje de **hombres blancos de 85 o más años de edad** que se quitan la vida es cinco veces mayor que el porcentaje nacional de los demás suicidios.

La curva del suicidio llega para mujeres a su máximo para las de 45 a 54 años de edad y vuelve a subir para las que pasan de los 85.

El alcoholismo interviene en alrededor del 30 % de los suicidios consumados.

Aproximadamente un 7 % de los **alcohólicos** se suicidan.

El 83 % de las muertes que se producen en los hogares estadounidenses relacionadas con **armas de fuego** son suicidios.

Quitarse la vida con un arma de fuego es la **modalidad de suicidio** cuya frecuencia está creciendo más deprisa.

Cada año, en los EE.UU., **el número de suicidios es doble** que el de homicidios.

En los EE.UU. son suicidios casi el 57 % de las **muertes por arma de fuego**; en el 60 % de todos los suicidios se emplean armas de fuego.

siderado que la impulsividad era un factor que contaba a la hora de predecir suicidios. Aunque algunos planean cuidadosamente sus muertes —dejan notas o testamentos y hasta preparan sus funerales—, el suicidio de muchos otros, incluido el de mi madre, parece haber sido espontáneo: una mala decisión tomada un mal día. De ahí que Arango y Mann anden buscando en esos cerebros indicios que les lleven hasta los fundamentos biológicos de aquella impulsividad. Uno de los puntos en que se fija su atención es el de las diferencias en la disponibilidad de serotonina; investigaciones anteriores sobre las causas de la impulsividad la correlacionaron con la escasez de esa sustancia.

La serotonina es un neurotransmisor, una de las moléculas que, al salvar las hendiduras entre neuronas llamadas sinapsis, transmiten señales entre esas células del cerebro. Cada neurona emisora de señales, o neurona presináptica, posee unas vesículas que segregan serotonina en la hendidura sináptica. Los receptores existentes en las neuronas postsinápticas, las que reciben la señal, se unen al neurotransmisor y registran en la célula cambios bioquímicos que alteran su capacidad de responder a otros estímulos o de activar o desactivar genes. Tras un breve intervalo, las células presinápticas resorben la serotonina valiéndose de unas "esponjas", los portadores de la serotonina.

La serotonina ejerce en el cerebro una influencia calmante. El prozac y similares drogas antidepresivas se unen a los portadores de la serotonina y evitan que las neuronas presinápticas absorban demasiado deprisa la serotonina segregada, con lo que ésta permanece un poco más en la sinapsis y sigue generando su efecto calmante.

Huellas del padecimiento

Durante más de veinte años se han venido relacionando los bajos niveles de serotonina en el cerebro con la depresión, el comportamiento agresivo y una tendencia a la agresividad, pero los datos han sido particularmente confusos con respecto al suicidio. Algunos estudios han hallado una reducción de la serotonina en los cerebros de los suicidas, pero otros no. Algunos han observado una falta de serotonina en una parte del cerebro, aunque no en el resto. También se han visto aumentos del número de receptores de la serotonina o deficiencias en la cadena de procesos químicos que transmiten la señal serotonínica desde esos receptores hasta el interior de una neurona.

A pesar de las discordancias, la mayoría de los datos apunta con firmeza a que en los cerebros de los suicidas el sistema serotonínico padece algún problema. Arango y Mann han acentuado esa sospecha con sus recientes hallazgos.

Una escena en el laboratorio de Arango: un ayudante, inclinado sobre una cámara frigorífica abierta, rebana con el microtomo una lámina delgadísima de un cerebro congelado (lo donaron unos parientes afligidos, deseosos de que se investigue el misterio del suicidio). Valiéndose de un pincel también congelado, Arango arrastra a continuación el tejido rebanado a un portaobjetos del tamaño de una foto corriente. La lámina de cerebro se descongela al calor de su mano enguantada.

Los cerebros de la colección de la Universidad de Columbia se dividen en hemisferios derechos e izquierdos; cada hemisferio, a su vez, se divide de adelante atrás en 10 o 12 bloques. Cada bloque, una vez congelado y pasado por el microtomo, proporciona unas 160 laminillas más delgadas que un cabello humano.

Así, los colaboradores de Arango y Mann pueden llevar a cabo varias pruebas bioquímicas distintas en un mismo cerebro y conocer con exactitud la localización anatómica de las variantes que encuentren. Ensamblando por medio del ordenador los cortes, configuran un modelo virtual del efecto de esas anomalías en el comportamiento.

En un congreso del Colegio Americano de Neuropsicofarmacología celebrado en 2001, informó Arango de que la corteza prefrontal orbital —la parte del cerebro situada justo encima de cada ojo— de los depresivos suicidas estudiados contaba con menos neuronas. Aún más: en los ce-

LA “MAGIA” DEL LITIO

Parece ser que el litio impide el suicidio. ¿Por qué lo toman tan pocas personas propensas a suicidarse?

“El litio es el más ligero de los elementos sólidos; quizá no sea de extrañar que posea cualidades un tanto mágicas.”
—G. P. Hartigan, psiquiatra

“¡Sólo los chiflados toman litio!”, espetó mi madre en una de nuestras muchas discusiones sobre si estaba recibiendo el mejor tratamiento para su psicosis maniaco-depresiva. Nos acusaba a mi padrastro y a mí de que si queríamos medicarla tanto era únicamente para que mantuviese “la boca cerrada”. Y la verdad es que, en parte, era cierto: resulta de lo más agotador convivir con una persona maníaca que exteriorice a menudo un inacabable monólogo interior.

Muchos le encuentran a tomar litio —que suele suministrase en forma de cápsulas de carbonato o citrato de litio— sus inconvenientes: puede causar temblores de manos, sed incesante, necesidad de orinar con mucha frecuencia, aumento de peso, aletargamiento, mengua de la coordinación muscular, pensamiento confuso y fallos de la memoria a corto plazo.

Quienes lo tomen deberán también analizarse con regularidad para comprobar que su concentración en la sangre cae en el intervalo correcto: por debajo de 0,6 milimoles por litro de suero sanguíneo suele ser ineficaz; por encima de los 2 milimoles por litro puede producir intoxicaciones letales.

Es común que se recurra al litio para regularizar los bruscos y extremados cambios de talante de quienes padecen de psicosis maniacodepresiva, o trastorno bipolar. También se está recomendando cada vez más el litio a personas afectadas de depresión. Pero no deja de crecer el cúmulo de pruebas de que este elemento puede mantener vivos a quienes corren el riesgo de suicidarse. En 1998, Mogens Schou, del Hospital Psiquiátrico de Risskov, Dinamarca, uno de los primeros en emplear el litio, recopiló los resultados de diversos estudios acerca de su utilidad en la prevención del suicidio. Observó que la probabilidad de que quienes no lo tomaban se suicidasen era hasta 17 veces mayor que la probabilidad de que lo hiciesen sujetos deprimidos a los que se les administraba. Schou calculó asimismo que el litio reducía entre 6 y 15 veces los intentos de suicidarse.

¿Cómo ejerce el litio sus saludables efectos? Pese a algunos vislumbres atractivos, aún se desconoce. “Por ahora, es difícil de decir”, afirma Ghanshyam N. Pandey, de la Universidad de Illinois. “¡Actúa de tantos modos!” Se cree que el litio afecta a unos puertos microscópicos, los canales iónicos, presentes en las superficies de las neuronas. Estos canales iónicos, al abrirse o cerrarse, dejan entrar o vedan el paso a los iones que determinan el potencial eléctrico del interior de las células. Así dictan la actividad de éstas y rigen su capacidad de comunicarse con otras neuronas. Se supone que el litio estabiliza la excitabilidad de las neuronas gracias a su efecto en los canales iónicos; o quizá modifique la reacción en cadena de los procesos bioquímicos que ocurren en el interior de una célula excitada.

Pero un medicamento sólo funciona bien si se toma como es debido. En el número de mayo de 2002 del *Journal of Clinical Psychiatry* Jan Scott y Marie Pope, de la Universidad de Glasgow, informaron de que la mitad de un grupo de 98 pacientes que tomaba un medicamento estabilizador del estado de ánimo dejaron de tomarlo en las dosis debidas. Sin embargo, llamaba la atención de estos investigadores que sólo en un 1 % de las publicaciones sobre los estabilizadores se preguntara por qué hay pacientes que no ingieren las dosis de litio que se les prescriben.



EL LITIO es el más ligero de los elementos sólidos y flota en estado puro (*izquierda*). Administrado mediante cápsulas de carbonato de litio o citrato de litio (*arriba*), se utiliza para estabilizar los estados de ánimo.

THOMAS SIELNACHT (*frasco*); CUSTOM MEDICAL STOCK PHOTO (*píldora*)

J. John Mann, del Instituto Estatal de Psiquiatría de Nueva York, dice que un importante factor de tal incumplimiento es la inclinación, tan humana, a no considerarse enfermo. “Hay una resistencia natural a tomar durante largo tiempo cualquier medicina”, explica Mann. “Al depresivo le cuesta imaginarse que vaya a mejorar alguna vez, pero cuando se siente mejor es incapaz de creer que vaya a enfermar de nuevo.”

Los efectos secundarios del litio tienen también su importancia. Kay Redfield Jamison, psiquiatra que investiga en la Universidad de Johns Hopkins la psicosis maniacodepresiva y el suicidio —ella misma es maniacodepresiva—, ha hallado que los motivos que aducen con mayor frecuencia los enfermos para dejar de tomar la medicación son los efectos secundarios cognitivos, el aumento de peso y el deterioro de la coordinación. En su emocionante autobiografía, titulada *Una mente inquieta*, refiere su propia lucha por hacerse a la idea de que es probable que durante el resto de su vida tenga que enfrentarse a los efectos secundarios del litio. Quizá si mi madre hubiese vivido lo suficiente para leerla, el ejemplo de Jamison le habría dado ánimos y la habría motivado a iniciar la terapia del litio.

EL SUICIDIO EN ESPAÑA

En el decenio 1992-2001, la **media anual de suicidios** y tentativas fue de 2511 (según la Estadística del Suicidio del INE).

En ese período, **el mayor número de suicidios** y tentativas se produjo en 1997, 2747; el menor, en 2001: 2217 (uno cada cuatro horas; Estados Unidos tiene 290 millones de habitantes, un poco más de siete veces la población española, así que, a poblaciones iguales, habría en España unos cuarenta y tantos suicidios y tentativas registradas cada día, por 80 en Estados Unidos).

Ahora bien, conforme a la estadística de Defunciones según la Causa de Muerte del INE, de los más de 360.000 fallecimientos que hubo en España en 2000, 16.541 se debieron a causas externas; 3393 de ésos se atribuyeron a **suicidios y heridas autoinfligidas** (un 0,94 % del total de fallecimientos), más de ocho veces el número de fallecidos por homicidio, 411. La Estadística del Suicidio da 2537 suicidios y tentativas en 2000.

Los fallecimientos **atribuidos a suicidios** y heridas autoinfligidas se duplicaron entre 1980 (1652) y mediados del decenio de 1990, momento en que se estabilizó su número.

rebros de los suicidas esa área sólo disponía de un tercio del número de portadores de serotonina presinápticos presente en los cerebros de control; en cambio, reunía alrededor de un 30 % más de receptores serotonínicos postsinápticos.

La suma de estos resultados da a entender que los cerebros de los suicidas tratan de sacar el mayor partido posible de cada una de las moléculas de serotonina con que cuentan: aumentan el equipamiento molecular con que las neuronas enlazan el neurotransmisor y disminuyen a la vez el número de transportes que lo resorben. "Creemos que el sistema serotonérgico de los suicidas es defectuoso", concluye Arango. "Quizás estén tan enfermos que el prozac no pueda auxiliarles." Inhibir la resorción de serotonina no siempre basta para evitar el suicidio; no fue suficiente en el caso de mi madre, pues aunque tomaba diariamente 40 miligramos de prozac se quitó la vida.

Mann y sus colegas tratan ahora de preparar una prueba con tomografía por emisión de positrones que ayude un día a los médicos a determinar qué pacientes tienen más deteriorado el circuito de la serotonina y corren por ello mayor riesgo de suicidarse. La tomografía, al indicar qué regiones del cerebro consumen la mayor cantidad de glucosa sanguínea, proporciona una imagen bastante precisa de la actividad cerebral; con la administración de ciertos fármacos, la fenfluoramina por ejemplo, que inducen la secreción de serotonina, se precisan mejor las áreas activas del cerebro que utilizan la serotonina.

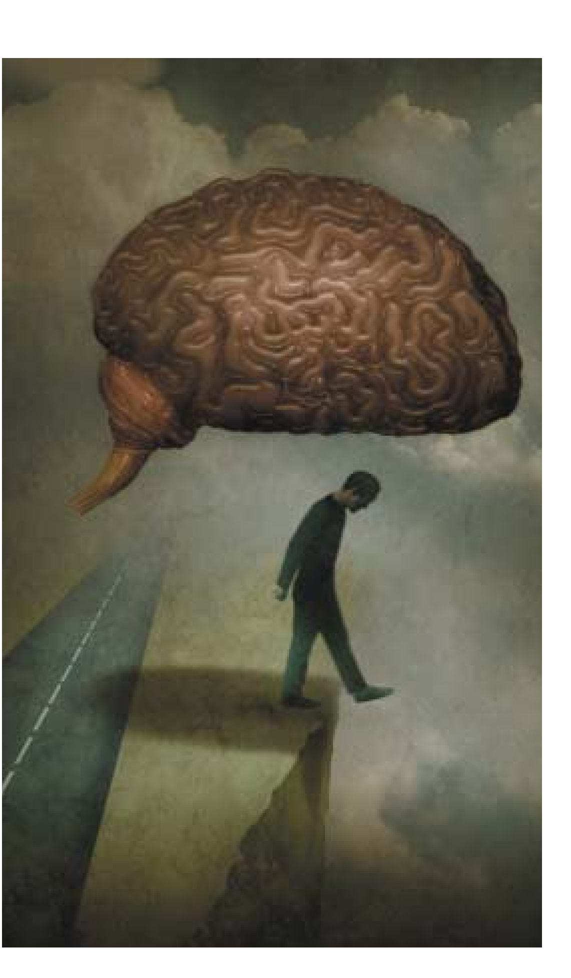
En el número de enero de la revista *Archives of General Psychiatry*, Mann y sus colaboradores comunicaron que hay una relación entre la actividad de la corteza prefrontal de quienes habían intentado suicidarse y la consumación de su propósito. Los que recurrieron a los medios más contundentes —tomarse todo un frasco de píldoras o tirarse desde la mayor altura que pudieron— poseían en su corteza prefrontal menos actividad basada en la serotonina. "Cuanto más cerca de lograr el objetivo estuvo el intento de suicidio, mayor era la anomalía", observa Mann.

Ghanshyam N. Pandey, de la Universidad de Illinois, está de acuerdo en que el sistema serotonínico del cerebro es una pieza fundamental de la explicación del suicidio: "Muchos datos indican que los suicidas padecen deficiencias serotonínicas. Pero no es un problema aislado; va unido a otras carencias. Parece que está alterado todo el sistema."

La hipótesis de la serotonina no excluye que otros neurotransmisores desempeñen papeles importantes. La serotonina es sólo una molécula más de una intrincada red bioquímica, el "eje hipotalámico-pituitárico-adrenalínico" (HPA), en la que el hipotálamo y la pituitaria, glándulas cerebrales, se comunican con las glándulas suprarrenales que segregan la adrenalina. El HPA se encarga del mecanismo de reacción conocido como "de lucha o fuga"; el acelerado latir del corazón y el humedecimiento de las palmas de las manos cuando se ha evitado de milagro un accidente, digamos, son manifestaciones de esa reacción. El factor liberador de la corticotrofina, segregado por el hipotálamo en los momentos de estrés, hace que la pituitaria anterior produzca la hormona adrenocorticotrópica, la cual a su vez causa que la corteza suprarrenal produzca glucocorticoides, entre ellos el cortisol, que prepara al cuerpo para el estrés: aumenta las concentraciones de azúcar en la sangre y el ritmo cardiaco, e inhibe una reacción inmunitaria excesiva.

A la serotonina le corresponde en la red del HPA adaptar el umbral de estimulación. El grupo de Charles B. Nemeroff, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Emory, ha descubierto que haber sufrido durante la infancia experiencias nocivas, el abuso sexual por ejemplo, puede dañar el eje HPA e inscribir en el cerebro improntas bioquímicas que causarán más adelante reacciones excesivas al estrés; esta anomalía propiciará que el sujeto sea propenso a la depresión.

En 1995, el grupo de Pandey indicó que se podían descubrir las anomalías del circuito serotonínico de los individuos con riesgo de suicidio mediante un análisis de sangre bastante sencillo. Comparando el número de receptores de la serotonina que las personas tendentes a



suicidarse tenían en las plaquetas (células coagulantes) de la sangre con el de quienes carecían de esa tendencia, observaron que en aquéllas los receptores de serotonina eran mucho más abundantes. (No está claro por qué las plaquetas tienen receptores de serotonina.)

Explica Pandey que su grupo llegó a la conclusión de que ese número mayor de receptores refleja un aumento paralelo en los cerebros proclives al suicidio, un vano intento de acopiar tanta serotonina como les fuese posible. Para probar el nexo, Pandey querría averiguar si se mantiene en quienes acabarán quitándose la vida. "Queremos saber si las plaquetas sirven de marcadores que identifiquen a los proclives al suicidio", dice. "Vamos progresando, pero con lentitud."

Una maldición de generaciones



Mientras no se disponga de análisis que puedan descubrir a tiempo a quienes corren un riesgo elevado de suicidarse, los médicos podrían concentrar sus esfuerzos en atender a la progenie de los suicidas. En el número de septiembre de 2002 de la revista *Archives of General Psychiatry,* Mann, David A. Brent, del Instituto Psiquiátrico y Clínico del Oeste, en Pittsburgh, y sus colaboradores publicaron que los hijos de personas que intentaron suicidarse corren seis veces más riesgo de quitarse la vida que aquellos cuyos padres nunca lo intentaron. El vínculo parece, en parte, genético, pero los esfuerzos por descubrir un gen o varios que predispongan a suicidarse no han proporcionado aún respuestas directas. Los estudios realizados a comienzos de los años noventa por Alec Roy, del Centro Médico del Este de Orange, Nueva Jersey, arrojaron que un 13 % de los hermanos gemelos de suicidas fueron también suicidas; en cambio, sólo el 0,7 % de los mellizos tuvieron el mismo fin que sus hermanos que se quitaron la vida.

Estas estadísticas nos ponen sobre aviso a cuantos tenemos lazos biológicos con suicidas. Guardo en mi dormitorio una bala de la misma caja que contuvo la que mató a mi madre. Tras su muerte, la policía se llevó la pistola, y yo misma, al limpiar el armario del dormitorio, tiré las restantes balas. Pero me agrada pensar que conservé este trozo de frío metal como un recordatorio de lo débil que es la vida y de las inmensas y desoladoras consecuencias que una acción impulsiva puede tener. Quizás algún día llegue la ciencia a comprender mejor el porqué de tan desgarradores actos y salvará con ello a muchas familias parecidas a la mía.

Bibliografía complementaria

NIGHT FALLS FAST: UNDERSTANDING SUICIDE. Kay Redfield Jamison. Vintage Books, 2000.

REDUCING SUICIDE: A NATIONAL IMPERATIVE. Institute of Medicine. Dirigido por Sarah K. Goldsmith, Terry C. Pellmar, Arthur M. Kleinman y William E. Bunney. National Academies Press, 2002.

De nuevo según la Estadística del Suicidio, en 2001 se suicidaron, o lo intentaron, **1611 varones y 601 mujeres**. El número de casos por grupos de edad sube hasta llegar al de 30-39 años (266 varones, 89 mujeres) y desciende hasta el de mayores de 60 años, donde crece mucho (621 varones y 209 mujeres).

En 2001, **el medio más común de suicidarse** o intentarlo fue por asfixia, 931 casos; 513 veces los suicidas se arrojaron desde una altura y en 124 usaron un arma de fuego (este último medio es casi exclusivamente masculino: 118 varones recurrieron a él, por sólo 6 mujeres)

Por cada 100.000 habitantes, cada año de ese decenio hubo, en promedio, 6,37 **suicidios y tentativas**; si sólo se toman en cuenta los trece millones largos de personas que viven en capitales, el promedio desciende a 5,13.

En el quinquenio 1997-2001, las **provincias con más suicidios** y tentativas por 100.000 habitantes fueron Lugo (15,70 de media anual), Soria (13,40), Avila (10,70), Asturias (9,80) y Teruel (9,70); donde menos hubo fue en Ceuta (0,80), Las Palmas (2,40), Madrid (3,10), Zaragoza (3,30) y Badajoz (3,50).

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (www.ine.es/inebase/cgi/um)

Grandes estructuras del universo y lentes débiles

Los cúmulos de galaxias distorsionan las imágenes de otras galaxias más lejanas. La medición de este efecto de lente demuestra que la mayor parte de la masa del universo es materia invisible

Jordi Miralda Escudé

La experiencia cotidiana nos demuestra que la luz de los objetos que hay a nuestro alrededor nos da una imagen fidedigna y precisa de su forma. No es así, en cambio, cuando los contemplamos a través de un medio que refracte la luz. Una barra perfectamente recta introducida en el agua parecerá que se ha torcido en el punto de contacto con la superficie líquida. Este hecho bien conocido se debe a la refracción de la luz, o desviación de su trayectoria al pasar del agua al aire. El mismo fenómeno ocurre en las lentes de nuestras gafas o de cualquier instrumento óptico. El aire refracta también la luz; por eso nos parece el Sol un poco elíptico cerca del horizonte.

Cuando, en ausencia de cualquier tipo de refracción, observamos estrellas o galaxias lejanas a través del espacio vacío, la intuición nos inclina a pensar que las imágenes que captamos corresponden exactamente a la forma del astro visto. Sin embargo, la imagen de un objeto celeste lejano puede distorsionarse incluso cuando los rayos de luz se propagan en el vacío: la gravedad de otros objetos de gran masa que haya cercanos a su trayectoria será la causa. La deflexión gravitatoria de la luz recuerda (aunque el origen sea distinto) a la refracción a través de un medio.

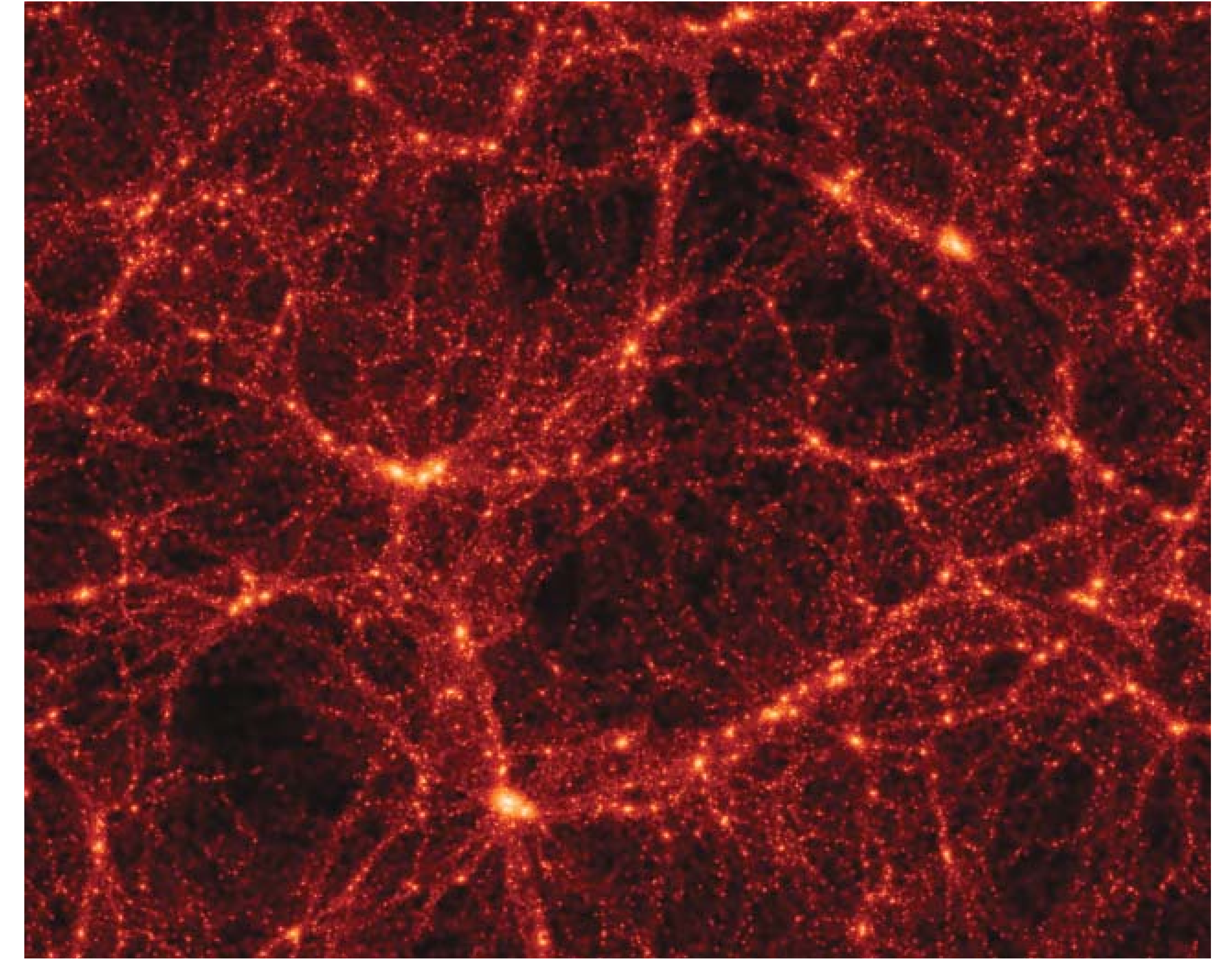
Según la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, el espacio y el tiempo forman una estructura unificada cuadridimensional (tres dimensiones espaciales y una temporal); la gravedad no es otra cosa que la curvatura de ese espacio-tiempo. La masa y la energía presentes en cada punto del universo constituyen la fuente de la gravedad; determinan cómo el espacio-tiempo debe curvarse. A la vez, la curvatura del espacio-tiempo determina cómo debe moverse cualquier objeto, sea una partícula material o un rayo de luz. En ausencia de gravedad, el espacio-tiempo es plano y todos los rayos de luz se propagan en línea recta. Pero cuando la gravedad cuenta, se desvían unos respecto a los otros. Así, dos rayos inicialmente paralelos dejan de serlo tras pasar cerca de un objeto de masa grande.

Lentes gravitatorias

El fenómeno de la desviación de los rayos de luz por la gravedad recibe el nombre de "lente gravitatoria". Una galaxia lejana emite luz que, tras un largo viaje a través del universo, se detecta en la Tierra. Por el camino se encuentra un cúmulo de galaxias. Los cúmulos galácticos son los objetos, ligados por la gravedad, de mayor masa que existen en el universo; constan de centenares de galaxias que describen órbitas alrededor de un centro común de masa. La masa ingente del cúmulo actúa como lente gravitatoria: la galaxia del fondo se observará en una posición distinta desde la Tierra y su imagen quedará distorsionada; hasta es posible que aparezcan imágenes múltiples, como puede suceder cuando se mira a través de una lente de cristal.

En general, las galaxias de un campo arbitrario del cielo no forman parte de ninguna estructura común, sino que se encuentran a distintas distancias de nosotros; el que las veamos próximas en el firmamento se debe a la proyección. Si se interpone un cúmulo galáctico entre la Tierra y las galaxias "del fondo", la lente gravitatoria producida por el cúmulo distorsionará las imágenes de esas otras galaxias: las alargará en la dirección tangencial respecto del centro del cúmulo. La distorsión es máxima cuando la posición original de la galaxia cae muy cerca del eje, detrás del cúmulo; las imágenes que se observan entonces forman arcos de anillo alrededor del centro, con un radio determinado por el ángulo de deflexión de la luz. La distorsión disminuye gradualmente con la distancia a ese eje (*véase la figura 3*).

En el caso, idealizado, de una lente gravitatoria perfectamente esférica y regular, la imagen de una galaxia que se encontrase con exactitud detrás del centro



1. LA FORMACION de las grandes estructuras cósmicas según una simulación de los efectos de las contracciones ("colapsos") gravitatorios en el universo. Las zonas de mayor brillo representan las regiones de mayor densidad en el espacio; están unidas por estructuras filamentosas. La manera en que está repartida la masa por el universo se manifiesta en las distorsiones que sufren las imágenes de las galaxias lejanas.

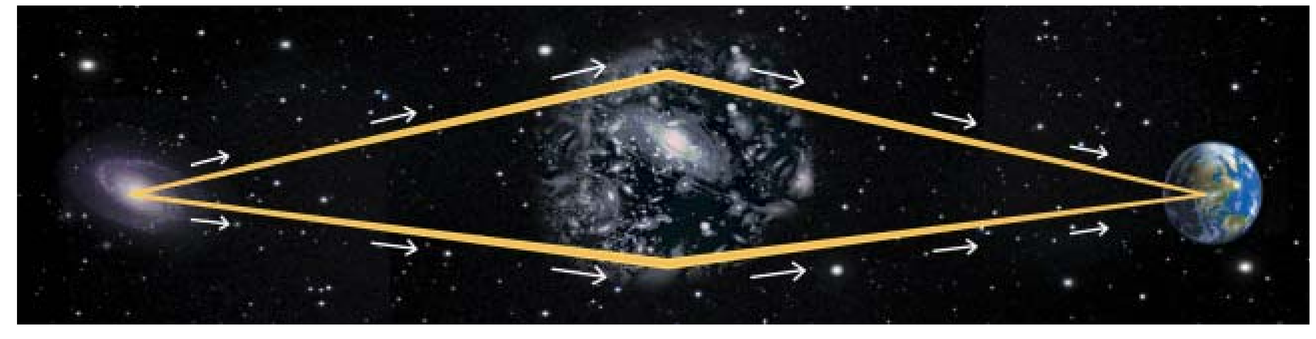
GRUPO VIRGO, CENTRO DE CALCULO MAX PLANK EN GARCHING Y CENTRO DE COMPUTACION EN PARALELO, EDIMBURGO

del cúmulo sería un anillo completo. En realidad, siempre hay cierta elipticidad e irregularidad en la distribución de la masa de los cúmulos de galaxias; en virtud de ello, la imagen de una galaxia muy distorsionada constará de uno o varios arcos de círculo.

La materia invisible

A partir de la distorsión que sufren las imágenes de las galaxias de fondo, medida en función de la distancia al centro del cúmulo de galaxias, se calcula la masa total del cúmulo dentro de un cierto radio. Este valor de la masa se obtiene a partir del efecto gravitatorio sobre los rayos de luz. Según la teoría de la relatividad, cualquier tipo de masa o energía, con independencia de su naturaleza, produce siempre la misma atracción gravitatoria sobre cualquier otra materia o rayo de luz. Por lo tanto, podemos estar seguros de que la masa total del cúmulo deducida a partir de la distorsión debida a la lente gravitatoria incluirá cualquier tipo de materia presente en el cúmulo. Comparamos luego esa masa total con los componentes del cúmulo que conocemos gracias a la luz que emiten. Hay dos componentes del cúmulo que observamos directamente: las estrellas que constituyen las galaxias del cúmulo, que emiten luz óptica, y el gas difuso que ocupa todo el espacio entre las galaxias (o medio intercumular), que desprende rayos X. Mediante el estudio de ambas emisiones podemos deducir la masa de esos dos componentes.

De estas mediciones se obtiene un resultado sorprendente: las estrellas y el gas del cúmulo, compuestos por las partículas elementales que forman la materia ordinaria (electrones, protones y neutrones), abarcan sólo un 10 % de la masa total. El 90 % restante es de un tipo de materia misterioso que no hemos podido detectar salvo por su gravedad. Se la llama *materia invisible*. También se la denomina a menudo "materia oscura", pero debemos tener en cuenta que un objeto oscuro, o negro, puede absorber luz aunque no la emita, así que es posible detectarlo mediante la ocultación de la luz emitida por otro objeto que haya detrás. La materia invisible no emite ni absorbe, no interacciona con la luz de ninguna forma (excepto la gravitatoria) que se haya podido detectar. No tenemos aún ningún indicio acerca de su naturaleza. Quizá se trate de partículas estables creadas en la gran explosión, no detectadas aún en los grandes aceleradores.


JORDI MIRALDA ESCUDE

2. POR LENTE GRAVITATORIA se entiende el fenómeno en virtud del cual una macroestructura del universo, un cúmulo galáctico, por ejemplo, desvía los rayos de luz provenientes de una galaxia lejana. La lente cambia la dirección en que se observa la galaxia y distorsiona su imagen. Cuando la densidad superficial de masa adquiere cierto valor, la lente puede hacer que converjan rayos distintos y producir imágenes múltiples de la galaxia.

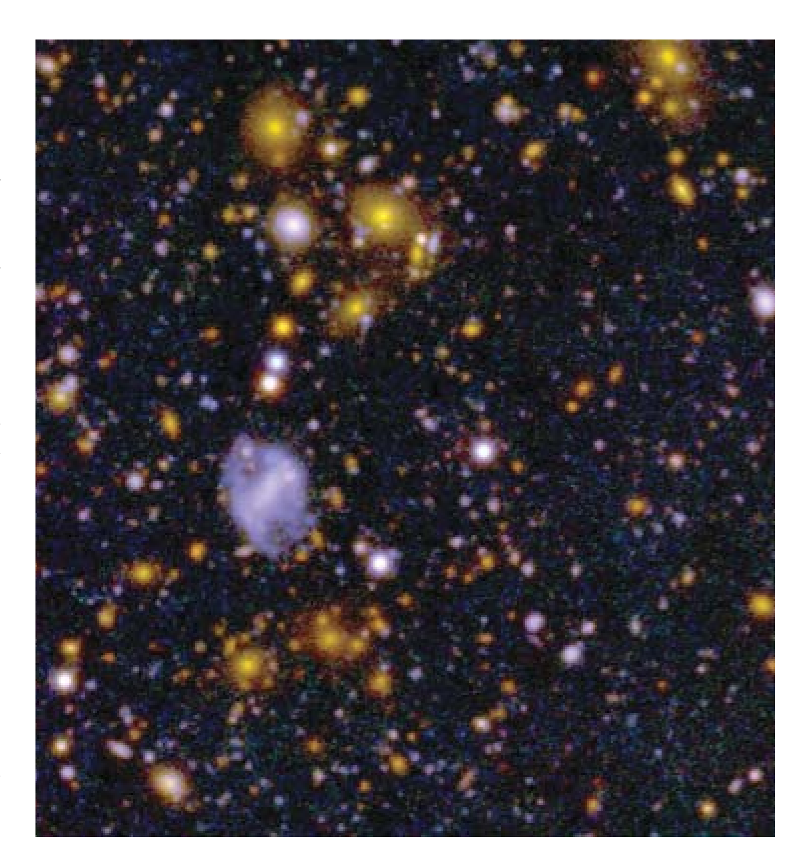
Los primeros indicios de la existencia de materia invisible son muy anteriores al descubrimiento, a mediados de los años ochenta, de cúmulos de galaxias que actuaban como lentes. Ya en el año 1933, el astrofísico suizo Fritz Zwicky observó que las grandes velocidades a que se mueven las galaxias en los cúmulos implican que la masa total de éstos debe ser mucho mayor que la masa de las galaxias componentes. Más tarde, en los años setenta, se demostró también que, en cada galaxia, las estrellas y las nebulosas más alejadas del centro se desplazan demasiado deprisa para mantenerse en sus órbitas, si la masa de la galaxia fuera sólo la de las estrellas que se observan. Hemos de suponer la existencia de un “halo” de materia invisible, situado alrededor de la galaxia, que contenga la mayor parte de la masa de ésta y produzca la gravedad necesaria para mantener en sus órbitas a las estrellas más alejadas.

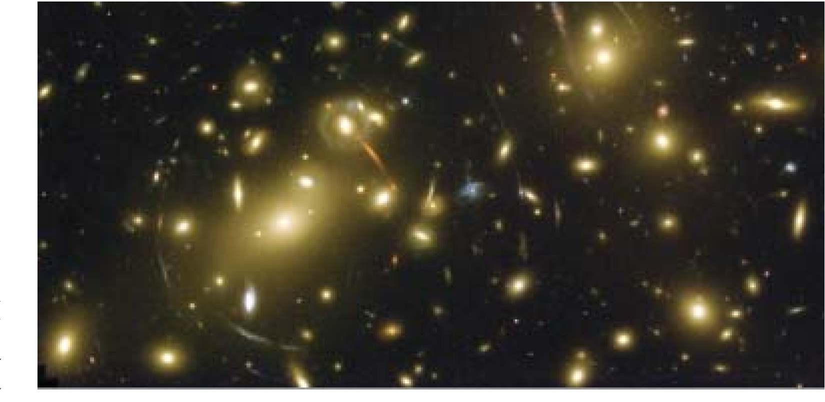
Por otra parte, las observaciones del gas intercumular mediante rayos X permiten medir no sólo su masa, sino también su temperatura; de la temperatura se deduce la presión del gas. La presión debe ser contrarrestada (como ocurre en la atmósfera terrestre) por la gravedad para que no se escape el gas del cúmulo hacia el espacio que lo rodea. De nuevo, el resultado indica que ha de haber masa en cuantía muy superior a la visible en los cúmulos para que estén en equilibrio: si no tuvieran más que la que identificamos en las galaxias y el gas, éste debería escaparse impelido por la fuerza de su propia presión.

Las observaciones del efecto de lente gravitatoria generado por los cúmulos de galaxias representan una confirmación espectacular de la existencia de la materia invisible. A partir de la deflexión observada de los rayos de luz se deduce, sin ningún tipo de ambigüedad y sin necesidad de suponer que el cúmulo se encuentra en equilibrio, la masa total dentro de la región del cúmulo donde se observan las imágenes distorsionadas de las galaxias del fondo.

Lentes gravitatorias débiles

Imaginemos que dibujamos en una hoja de papel blanca varios círculos negros y que los observamos a través de un cristal cuya superficie no es del todo plana, sino que tiene variaciones del grosor del cristal. El cristal es más grueso en ciertas regiones, que llamaremos “montes”, y más delgado en otras, los “valles”. Al mirar a través de un monte, el cristal actúa como una lente convergente y los círculos negros aparecen aumentados; al mirar a través de un valle, es divergente y se los ve más pequeños. Además del cambio en el tamaño, la lente causa una distorsión de la imagen que hace que los círculos parezcan elipses: la magnificación de un círculo por la lente no será igual en cada dirección. Si las variaciones del grosor adquieren cierta entidad, las distorsiones serán muy pronunciadas y llegarán a producirse imágenes múltiples de algunos círculos; habrá más de un camino por donde un rayo de luz emitido desde cualquiera de ellos llegue a nuestro ojo, una vez refractado. Pero si las variacio-





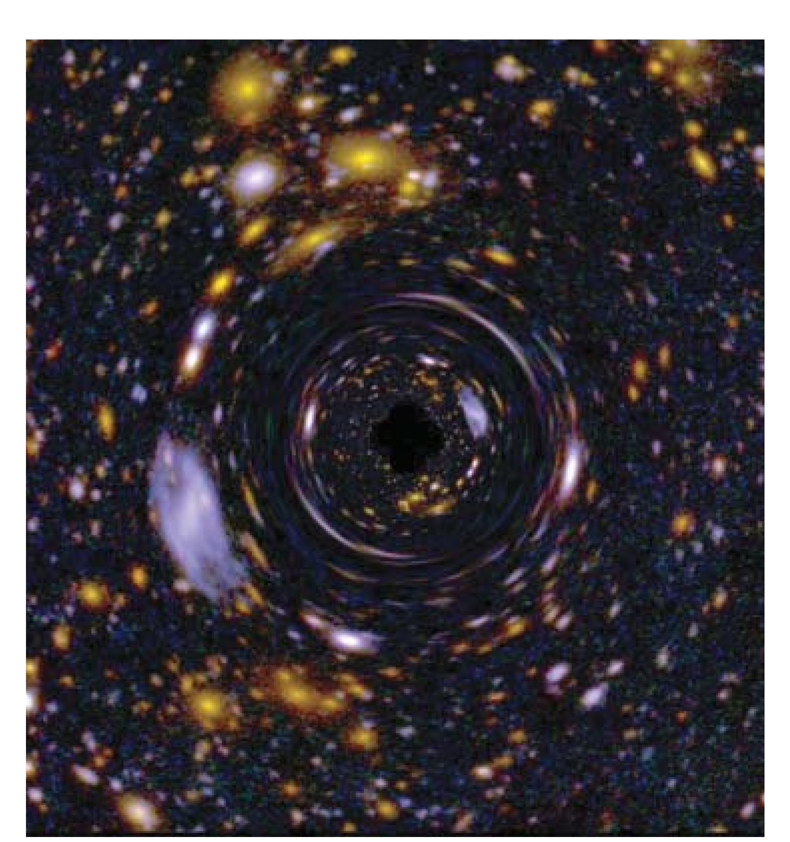
UNA LENTE GRAVITATORIA: el cúmulo Abell 2218 actúa sobre la luz de galaxias más lejanas

nes del grosor son pequeñas, habrá sólo una imagen de cada círculo, una elipse de poca elipticidad, muy parecida a un círculo. Observaremos con facilidad la distorsión que produce un vidrio irregular mirando a través de una ventana cuyo cristal no sea de muy buena calidad: la forma de los objetos cambiará cuando movamos un poco la cabeza. Cuanto peor sea la calidad del cristal (o más pronunciados los bultos), mayores resultarán las distorsiones.

A causa de la deflexión gravitatoria, nos encontramos exactamente con el mismo fenómeno cuando observamos galaxias lejanas. Mientras viajan desde la galaxia emisora hasta la Vía Láctea, los rayos de luz están constantemente sujetos a una deflexión gravitatoria por parte de las grandes estructuras que pueblan el universo. Cuando la proyección de las estructuras sobre el plano dé lugar a una densidad superficial de masa mayor que la media, las imágenes de las galaxias de fondo se magnificarán, al igual que los círculos negros tras un monte del cristal. Si la densidad superficial no alcanza la media, estaremos mirando a través de un valle y la lente encogerá las imágenes. Las imágenes no sólo se magnifican; se distorsionan alargándose a lo largo de un eje, como si la galaxia estuviera dibujada en una superficie de goma a la que se estirase en la dirección del alargamiento. Al igual que en la analogía del cristal con bultos, las distorsiones y magnificaciones serán mayores cuanto mayores sean las variaciones en la densidad superficial de masa proyectada, debidas a la presencia de varias grandes estructuras en la visual. En otras palabras, la densidad superficial de masa desempeña aquí el mismo papel que el grosor del cristal. Cuando las distorsiones y magnificaciones de las imágenes son pequeñas, se dice que la lente gravitatoria es débil, mientras que una lente gravitatoria fuerte produce grandes distorsiones e imágenes múltiples.

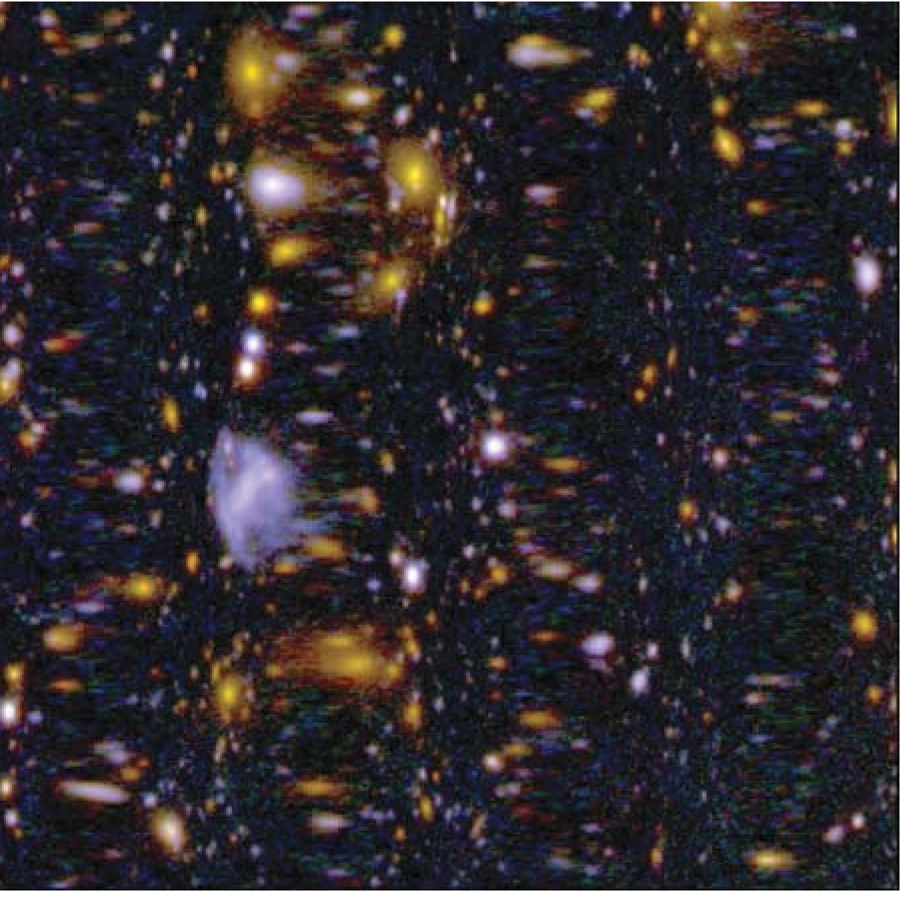
Si observásemos galaxias perfectamente esféricas —sus imágenes proyectadas en el cielo dibujarían círculos perfectos—, deduciríamos la distorsión que han sufrido los rayos de luz contemplando la elipticidad de cada imagen. Pero las galaxias tienen en general formas arbitrarias, cada una con su propia elipticidad intrínseca. Si nos fijamos únicamente en una galaxia, no nos será posible saber con certidumbre que su imagen se ha distorsionado, ya que cabría atribuir la elipticidad apreciada a la acción de una lente débil o a su forma real. Así, una galaxia espiral (en disco) puede parecer elíptica una vez proyectada en el cielo según esté orientado el plano del disco desde nuestra perspectiva. Sin embargo, cuando observamos muchas galaxias en una región nos encontramos con que sus ejes mayores tienden a orientarse en una misma dirección. Esta tendencia no puede deberse a la forma real de las galaxias, ya que cada una de ellas es independiente y están, en general, a una distancia de nosotros distinta. Podemos deducir, por lo tanto, que el alineamiento deriva del fenómeno de la lente débil. Una vez hemos promediado las elipticidades de varias galaxias en una misma región, es posible inferir cuantitativamente la distorsión gravitatoria aplicada y, a partir de ahí, calcular la densidad superficial de masa de la lente en distintas regiones del cielo.

Detectó por primera vez el fenómeno de la lente débil, en 1990, un equipo dirigido por J. A. Tyson, de los Laboratorios Bell. Observaron las galaxias situadas detrás de un cúmulo. En la región central del



3. LA IMAGEN de la izquierda muestra una región típica del cielo; la mayor parte de los objetos son galaxias lejanas. Si una concentración de masa esférica estuviese situada en el centro de la imagen, delante de las galaxias visibles, la forma de éstas aparecería distorsionada, tal como se ve en la imagen simulada de la derecha. En el caso de que se tratase de una lente gravitatoria real, de un verdadero cúmulo de galaxias, debería observarse también una gran cantidad de galaxias pertenecientes al cúmulo en cuestión; esas galaxias, y cualquiera que se encontrara delante del cúmulo, no sufrirían ninguna deflexión ni distorsión gravitatorias.

NASA, A. FRUCHTER Y EQUIPO ERO (*arriba*); J. A. TYSON Y D. WITTMAN, ©BELL LABS, LUCENT TECHNOLOGIES (*abajo*)



4. SIMULACION DEL EFECTO DE LA LENTE DEBIL en las imágenes de galaxias del panel izquierdo de la figura 3. Sin embargo, suponemos ahora que varias estructuras han causado la distorsión. La lente débil se detecta observando que las elipticidades de varias galaxias tienden, en una misma región del cielo, a estar alineadas.

J. A. TYSON Y D. WITTMAN, ©BELL LABS, LUCENT TECHNOLOGIES

cúmulo, la densidad superficial de masa adquiere un valor suficiente para dar lugar a una lente fuerte, con grandes distorsiones de las imágenes. Pero en regiones más alejadas del centro, el efecto disminuye de un modo gradual hasta que sólo se puede detectarlo promediando sobre varios objetos.

Desde entonces, se han medido con precisión las distorsiones que causan las lentes débiles correspondientes a muchos cúmulos de galaxias; así se ha podido deducir la cantidad de masa no sólo en la región central, donde se observan los efectos de la lente fuerte, sino también a mayores distancias del centro.

Varios equipos de investigadores han detectado el efecto de la lente gravitatoria débil en campos del cielo seleccionados de forma aleatoria, sin que se supiese de la presencia de un cúmulo. En general, existen estructuras de gran masa capaces de actuar como lentes débiles en todo el volumen del universo y a distintas escalas (desde las galaxias individuales hasta escalas mayores que la de los cúmulos). Cuando miramos en cualquier dirección del cielo, varias de esas macroestructuras contribuirán al total de la distorsión de las imágenes de las galaxias lejanas. Los cúmulos de galaxias sólo son, entre esas estructuras, las más concentradas y de mayor masa, las que menos cuesta identificar a partir de las galaxias que contienen y de los rayos X que emite su medio intercumular. En la mayoría de las regiones del cielo, la distorsión gravitatoria de las imágenes de las galaxias es pequeña y se debe a varias estructuras situadas a lo largo de la visual, pero cuando se está observando a través de un cúmulo, es la masa de éste la que aporta la mayor contribución.

La distorsión creada por las lentes gravitatorias aumenta con la distancia a la galaxia que emita la luz afectada, ya que cuanto más alejada esté, más estructuras masivas se interpondrán a lo largo de la trayectoria de la luz. Las galaxias más débiles que captamos con los telescopios ópticos modernos se encuentran ya a las mayores distancias cosmológicas que es posible observar, determinadas por la edad actual del universo: unos quince mil millones de años luz. A esas distancias, la distorsión típica de cada imagen es de un 3 %. Dicho de otro modo, una galaxia circular se observa como una elipse en la que el eje mayor es un 3 % más largo que el menor.

El autor

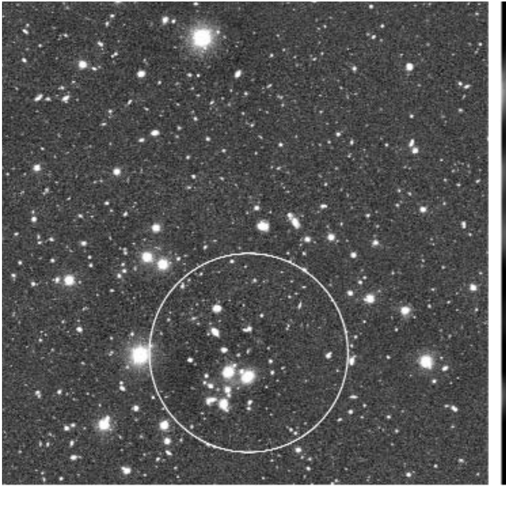
JORDI MIRALDA ESCUDE se doctoró en la Universidad de Princeton en 1991. Actualmente es profesor de la Universidad estatal de Ohio e investiga las lentes gravitatorias, la evolución del medio intergaláctico y el centro de la Vía Láctea.

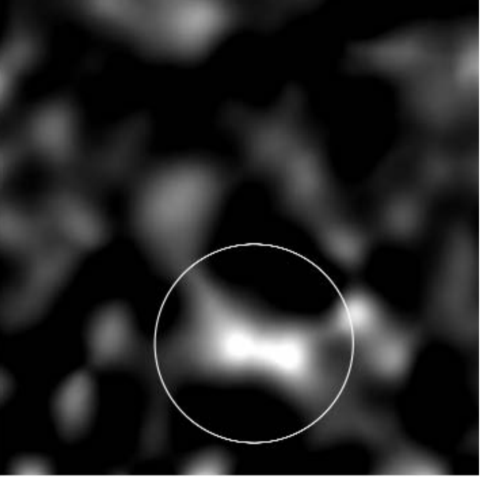
Formación de estructuras en el universo

La detección de lentes gravitatorias débiles en regiones aleatorias del cielo reviste sumo interés en cosmología. Nos permite medir propiedades de las fluctuaciones de masa en el universo a grandes escalas. Para entender la importancia de esas observaciones, debemos resumir algunos de los conceptos fundamentales de la teoría de la gran explosión y de la formación de estructuras en el universo.

De acuerdo con la teoría de la gran explosión, el origen de nuestro universo se sitúa hace unos quince mil millones de años, en un estado en que toda la materia se encontraba en un volumen mucho más reducido que el actual y donde, por lo tanto, la densidad y la temperatura eran elevadísimas. El universo ha venido expandiéndose continuamente desde este estado inicial hasta llegar al presente. En un principio, la materia y la energía se distribuían de forma casi homogénea, es decir, la materia se hallaba diseminada de manera uniforme por todo el espacio con una densidad casi constante, al contrario de lo que sucede ahora, que se halla concentrada en galaxias y, dentro de éstas, en estrellas.

Una de las preguntas fundamentales de la cosmología moderna se refiere a la transformación del universo primitivo homogéneo en su actual estado heterogéneo. El proceso básico de formación de estructuras,





5. A PARTIR DE LAS ELONGACIONES y de la disposición de las galaxias del campo celeste que se ve en la fotografía de la izquierda, tomada con ANTU, uno de los componentes de 8,2 m de diámetro del Muy Gran Telescopio de Paranal, el equipo de Yannick Mellier, del Instituto de Astrofísica de París, dedujo la distribución de masa del universo, en esa dirección, que causaba tal efecto de lente débil. Esa distribución se representa en la imagen de la derecha. Corresponde en su mayor parte a materia invisible. El círculo rodea un cúmulo de galaxias lejano, que en el mapa de la derecha aparece como un manchón —una gran concentración de masa— brillante.

incluidas las galaxias individuales y los cúmulos de galaxias, es el derrumbe ("colapso"), impelido por la atracción gravitatoria, de acumulaciones de materia sobre sí mismas. Si la densidad de materia en una cierta región es en un principio un poco mayor que la densidad media, la atracción gravitatoria frenará la expansión y hará que la materia se vaya acumulando hasta que se detenga la expansión y produzca el colapso en la región donde existía el exceso de densidad; se crearán así una galaxia o un cúmulo.

La gravedad amplifica las fluctuaciones de densidad en el universo, pero no puede crearlas; no habría podido engendrar objetos si el universo hubiera empezado en un estado perfectamente homogéneo. Tuvieron que existir en el universo primitivo unas fluctuaciones de densidad iniciales. Se ha detectado su huella en la radiación cósmica de microondas remanente de la gran explosión, en la forma de fluctuaciones de la intensidad de la radiación (*véanse los artículos de* INVESTIGACIÓN Y CIENCIA "Radiación cósmica del fondo de microondas", por J. L. Sanz y E. Martínez, abril 1993; "Ecos de la Gran Explosión", por R. Caldwell y M. Kamionkowski, marzo 2001, y "Un cartógrafo cósmico", por C. L. Bennett, G. F. Hinshaw y L. Page, marzo 2001).

Un modelo de la formación de grandes estructuras, el del colapso gravitatorio jerárquico, cuenta en la actualidad con el respaldo de observaciones cosmológicas variadas —entre ellas la distribución espacial de galaxias y cúmulos y las fluctuaciones de la radiación cósmica de microondas mencionadas antes—. Según esta hipótesis, los colapsos gravitatorios crean primero estructuras a pequeña escala —galaxias enanas— y luego, poco a poco, mezclando los objetos pequeños que han ido generando en uno solo, estructuras de una escala y masa superiores. Hoy en día, las mayores estructuras del universo construidas por los colapsos gravitatorios son los cúmulos de galaxias, que se han formado a partir de la inmersión de multitud de galaxias engendradas anteriormente. A escalas superiores encontramos los supercúmulos, de masa mucho mayor —engloban varios cúmulos—, pero que no han pasado todavía de la fase de frenar localmente la expansión, previa a que empiece el colapso gravitatorio.

Para investigar en detalle los modelos de formación de estructuras en el universo, se requiere medir con precisión las propiedades estadísticas de la distribución de la masa en el espacio. Imaginemos, por ejemplo, que colocamos una esfera de radio R en un punto aleatorio del espacio y calculamos la densidad media de materia en su interior. Tras repetir el mismo proceso muchas veces, escogiendo distintos puntos al azar para el centro de la esfera, obtenemos una distribución de probabilidad de la densidad media; puede hacerse para distintos valores de R. De forma parecida, cuando observamos las distorsiones generadas por lentes débiles, podemos escoger un círculo centrado en un punto aleatorio del cielo y averiguar la distribución de probabilidad del valor medio de la distorsión dentro del círculo, en función del radio. A partir de la medición de propiedades como éstas, averiguaremos cuál de los varios posibles modelos de formación de estructuras en el universo está de acuerdo con la observación.

Las lentes débiles gozan de una característica que las convierte en herramientas observacionales únicas para escrutar la estructura del universo: gracias a ellas, cabe medir directamente la masa total a partir del efecto gravitatorio que tienen sobre la luz. Se trata de una propiedad excepcional, dado que la mayor parte de la materia del universo es invisible y sólo cabe detectarla mediante su gravedad. Cabe esperar, pues, que la observación de las lentes débiles ayude a descifrar los secretos de la composición y el origen del universo.

Bibliografía complementaria

WEAK LENSING AND COSMOLOGY. N. Kaiser en *The Astrophysical Journal*, n.º 498, págs. 26-42; 1998.

PROBING THE UNIVERSE WITH WEAK LENSING. Yannick Mellier en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, n.º 37, pág. 127-189; 1999.

DETECTION OF WEAK GRAVITATIONAL LENSING DISTORTIONS OF DISTANT GALAXIES BY COSMIC DARK MATTER AT LARGE SCALES. David M. Wittman, J. Anthony Tyson, David Kirkman, Ian Dell'Antonio y Gary Bernstein en *Nature*, vol. 405, págs. 143-148; 11 de mayo, 2000.

Ciencia y sociedad

Herramientas taxonómicas

Marcadores genéticos

En el marco de la citogenética vegetal, las observaciones microscópicas en cuanto al número, tamaño y morfología de los cromosomas y sus patrones de tinción han conducido al descubrimiento de numerosas características de interés.

Existen diversos métodos para la obtención de cariotipos y sus correspondientes cariogramas. Los datos pueden utilizarse para desentrañar la posible relación entre diferentes taxones. No siempre podemos determinar las características de un cariotipo, como ocurre en el caso de los que poseen cromosomas pequeños (inferiores a dos micras), ni podemos comparar diferentes cariotipos si éstos, además, presentan el mismo número cromosómico.

Cierto es que las técnicas de bandeo, que se aplican a la identificación de los cromosomas mediante diferenciación longitudinal, permiten identificar uno a uno todos los cromosomas de una especie. Pero se trata de un método no exento de limitaciones.

Por otra parte, la variabilidad fenotípica no existe sólo entre taxones distintos. Aparece también en el seno de poblaciones de un mismo taxón. La variabilidad fenotípica guarda una relación directa con el comportamiento ecológico y con la variabilidad genotípica. Además, la variación fenotípica constituye la base para estudios de evolución, porque las relaciones filogenéticas entre genotipos, poblaciones y especies sólo pueden deducirse de variaciones fenotípicas heredables. Pero no es cuantificable, ni puede detectarse con los métodos tradicionales. Se impone el recurso a métodos moleculares.

Los métodos de estudio de poblaciones de plantas basados en la reacción en cadena de la polimerasa han mostrado su eficacia en la cuantificación de la variabilidad del ADN en genomas. Se trata de un proceso que requiere como primer paso aislar el ADN para su multiplicación (amplificación). Una vez extraído el ADN, se emplean técnicas distintas de acuerdo con el fin de la investigación emprendida.

Entre tales técnicas merece destacarse la amplificación al azar de ADN polimórfico (RAPD). Constituye un método rápido, eficiente y económico para identificar genotipos. Fundado en amplificaciones



1. Zona encharcadiza de marisma baja, donde coexisten diferentes especies colonizadoras de Quenopodiaceas, muy similares en estadios jóvenes. La detección de especies, sin elementos florales, resulta de enorme dificultad en fases iniciales de la sucesión en medios estuarinos



2. Variabilidad fenotípica de Salicornia ramosissima *J. Woods. Los individuos aislados* (ejemplar 4) *presentan mayor desarrollo que los pertenecientes a poblaciones de alta densidad* (ejemplares 1, 2 y 3)



3. Polimorfismos genéticos de Salicornia ramosissima *en zonas de alta salinidad, con mayor independencia de las mareas, de marismas mediterráneas*

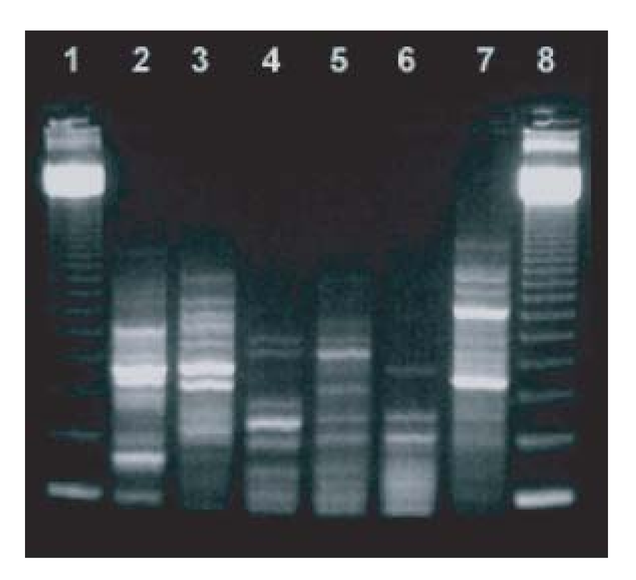
enzimáticas de fragmentos al azar de ADN, se ha aplicado con éxito en la detección de polimorfismos de plantas, animales, hongos y otros organismos. El segmento de partida está flanqueado por dos sondas de oligonucleótidos (cadena más o menos corta de bases nucleotídicas específicamente ordenadas). Las sondas son secuencias arbitrarias conocidas que, bajo condiciones adecuadas, se unen de manera específica (en el extremo 3') con la secuencia complementaria de nucleótidos del fragmento de ADN "molde", previamente desnaturalizado (95 ºC).

La sonda hibridada servirá de cebador para la síntesis de la cadena de ADN. Ello requiere la intervención de una polimerasa y la aportación de desoxinucleótidos. Estos componentes necesarios para la elongación de cadenas son estables al calor. La amplificación se produce en el segmento de ADN comprendido entre los sitios de reconocimiento de los dos oligonucleótidos cebadores.

El resultado de ciclos múltiples de calentamiento y enfriamiento es la alternancia entre desnaturalización y síntesis, lo que hace que el fragmento de ADN se acumule exponencialmente. Para separar ácidos nucleicos en función de su tamaño se emplea la electroforesis, que permite obtener patrones característicos de los fragmentos resultantes.

Los productos finales de la amplificación pueden servir de marcadores moleculares que faciliten la detección de polimorfismos del ADN (*figura 4*). Puesto que tales productos siempre son los mismos (en las mismas condiciones), el patrón de bandas obtenido será constante y característico. Los resultados permiten una comparación rápida entre muestras cuando no es necesario conocer o determinar la secuencia completa de nucleótidos. Aplicada esta técnica a los análisis de parentales, nos dirá si los polimorfismos identificados (entre los productos) los portan uno o ambos parentales. Aplicada en agronomía, facilitará la detección y descripción de los genotipos de los parentales de especies cultivadas con procedencia desconocida.

Un campo interesante de aplicación de estos marcadores moleculares reside en la investigación taxonómica y ecológica. Para dilucidar, por ejemplo, si nos hallamos ante una o varias especies. (Un caso típico en marismas mediterráneas es el de *Salicornia ramosissima* J. Woods (*figura 3*), que ofrece una amplia diversidad morfológica debido a la densidad de individuos, pudiendo ser tratadas como taxones diferentes.) La técnica permite también determinar los híbridos; así, entre especies del género *Spartina*, *Sarcocornia*, *Typha* o *Salix*. Mediante marcadores moleculares específicos se resuelven también problemas taxonómicos en los estadios prerreproductivos, cuando los caracteres morfológicos no resultan suficientemente discriminantes, en dichos estadios, o cambian en el curso de la sucesión.



4. Productos de amplificación obtenidos con el oligonucleótido P-07. Carril 2, Arthrocnemum macrostachyum *(Ar-50); 3,* Sarcocornia fruticosa *(Sarf-55); 4,* Sarcocornia perennis *(Sarp-58); 5,* Salicornia ramosissima *(Sali-59); 1 y 8, Escalera 123 bp*

Aplicada a los géneros *Spartina* y *Juniperus*, con esta técnica ha podido establecerse el fraccionamiento de poblaciones o de la distancia genética entre poblaciones en medios con aislamiento reproductivo y en gradientes latitudinales. En *Spartina* y en alguna especie de *Silene* ha permitido el establecimiento genético de ecotipos en zonas con elevada presión de contaminación. No acaban ahí sus posibilidades. En los mar-

cadores se apoyan las investigaciones de bancos de semillas en pastizales mediterráneos para resolver la heterogeneidad genética, así como los estudios sobre variación genética de especies clonales (*Spartina maritima* (Curtis) Fernal o *S. densiflora* Brongn).

TERESA LUQUE,
SUSANA REDONDO,
JESÚS CASTILLO
y ENRIQUE FIGUEROA
Departamento de Biología
Vegetal y Ecología,
Facultad de Biología,
Universidad de Sevilla

Almacenamiento magnético de datos

Perspectivas de futuro

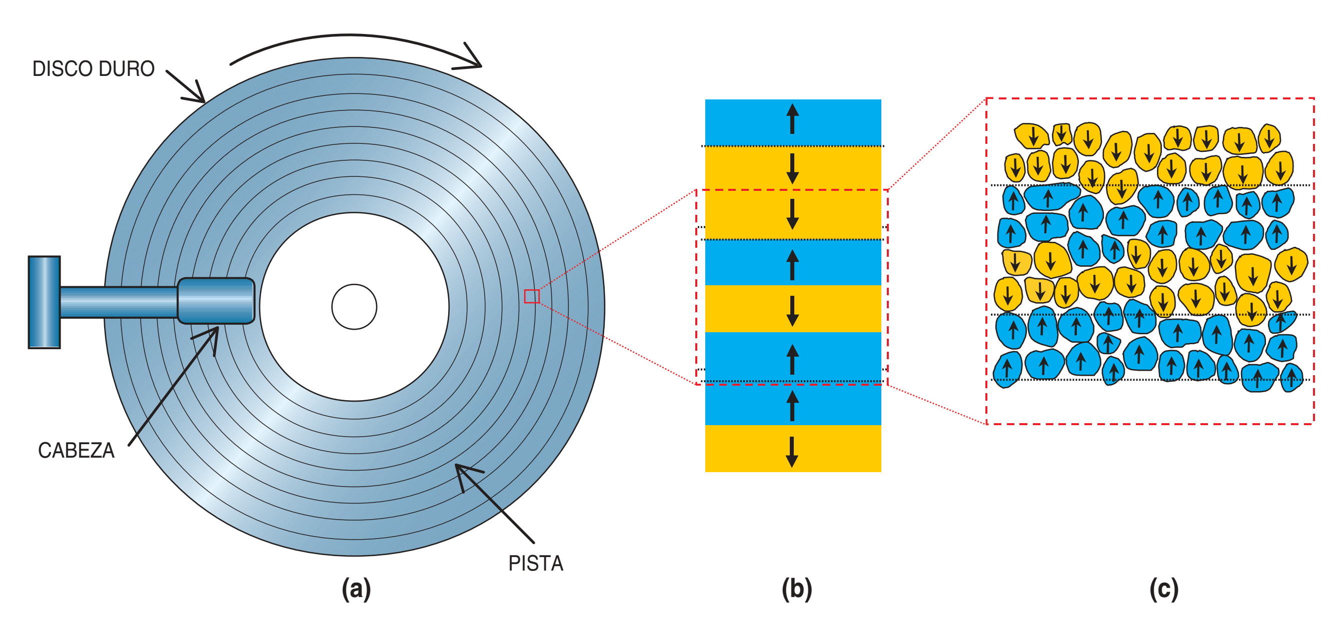
Los dispositivos de almacenamiento magnético de datos se presentan en diversos tipos, que van de las cintas de audio y vídeo hasta los "discos duros", pasado por los disquetes y otros. Sin embargo, el principio físico que permite grabar y leer información es el mismo en todos ellos.

¿En qué consiste ese principio? En un material magnético, el estado remanente (estado de magnetización con campo externo nulo) depende de la secuencia de campos magnéticos a los que dicho material ha sido expuesto con anterioridad. En particular, para grabar información en formato digital se utilizan partículas con dos únicos estados de magnetización posibles: positiva y negativa. En cuál de los dos se encuentra el sistema en un momento dado dependerá de la evolución del campo externo en el pasado. Estos dos estados se asocian unívocamente con las dos unidades básicas de información: bits "0" y "1".

Consideremos uno de esos soportes, el disco duro de nuestro ordenador (*figura, a*). Consta de un disco rígido que gira a 5000 revoluciones por minuto y de un brazo que posee un sensor en su extremo, o cabeza. Gracias al efecto combinado de la rotación del disco y el movimiento del brazo, la cabeza puede acceder a cualquier punto de la superficie del disco, en la que se encuentra depositada una película delgada de un material magnético que actúa como soporte de la información.

La cabeza consta de dos partes: una cabeza grabadora, que magnetiza la región a la que accede positiva o negativamente, y una cabeza lectora, que detecta el campo magnético que proviene del disco y, a partir de él, determina la dirección (positiva o negativa) en que dicha región se halla magnetizada. Así pues, la información almacenada en el disco está formada por una sucesión de zonas magnetizadas positivamente (bit "1") y negativamente (bit "0") dispuestas en fila a lo largo de pistas circulares concéntricas (*figura, b*).

La sociedad contemporánea demanda constantemente un aumento en la densidad de almacenamiento de datos. Esta densidad se mide en gigabits por pulgada cuadrada (Gb/in^2) y ha aumentado en un factor de diez millones durante la segunda mitad del siglo XX. Los discos duros utilizados hoy en día en los ordenadores personales alcanzan densidades entre 10 y 40 Gb/in^2 y ya existen algunos prototipos, aún no comercializados, que superan los 100 Gb/in^2. El espectacular ritmo de crecimiento en la densidad de grabación durante estos años (40 % anual en promedio) sin cambiar el principio básico de funcionamiento no tiene parangón en ningún otro campo de la ingeniería, exceptuando quizás el desarrollo del microchip, al cual está íntimamente ligado. Juntos constituyen, indudablemente, uno de los mayores logros técnicos del siglo XX. Sin embargo, existen serias dudas acerca de si este ritmo de crecimiento va a poder mantenerse en el futuro.



Representación esquemática de un disco duro (a)*; sucesión de bits en una pista del mismo* (b)*, y distribución de orientaciones de la magnetización en los granos que forman la película magnética*

La principal dificultad que se interpone tiene que ver con el hecho de que la película magnética en la que se graba la información no es uniforme, sino que está formada por pequeñas partículas magnéticas, llamadas granos, apiñadas en una matriz de un material no magnético (*figura, c*). Cada bit comprende un gran número de granos (en torno a 200) para que las transiciones entre bits queden bien definidas. Si el número de granos por bit disminuye, aumenta la posibilidad de leer bits erróneamente. Aumentar la densidad conlleva, por tanto, reducir el tamaño de los granos.

Sin embargo, no es posible reducir el tamaño de grano indefinidamente y seguir manteniendo la información almacenada, debido a la restricción impuesta por el superparamagnetismo. En efecto, de la misma forma que una molécula vibra y rota debido a la agitación térmica, la dirección de la magnetización en cada grano fluctúa por esta misma causa. A medida que el grano disminuye en tamaño, las fluctuaciones van cobrando mayor importancia.

Los granos utilizados en los discos duros de hoy en día son todavía grandes como para que estas fluctuaciones térmicas sean importantes, pero si el tamaño de grano continúa reduciéndose, llegará un momento en el que las fluctuaciones den lugar a giros de 180º en la dirección de la magnetización, convirtiendo bits "0" en "1" y viceversa, corrompiendo así la información almacenada. Las estimaciones teóricas predicen que el límite impuesto por este efecto se encuentra en torno a 150 Gb/in^2 que, al ritmo de crecimiento actual, se alcanzará en 2005.

En la actualidad, se están estudiando modificaciones que permitan esquivar o, cuando menos, retrasar el límite impuesto por el superparamagnetismo. La más prometedora de todas ellas consiste en crear, mediante técnicas de nanolitografía, distribuciones periódicas de islas magnéticas en un substrato no magnético. Cada una de estas islas, constituida por un solo grano, almacena un bit de información. Al estar magnéticamente aisladas entre sí, desaparecen los problemas de ruido en la señal asociados a las transiciones imperfectas en los medios continuos antes descritos. Estos sistemas se denominan discos duros cuantizados.

Aunque se hallan todavía en fase de estudio, se prevé que la comercialización de los discos duros cuantizados tenga lugar en los próximos años. (IBM tiene previsto disponer de un prototipo en 2004.) Con ellos es posible, en teoría, alcanzar densidades de grabación en torno a 400 Gb/in^2, si bien habrá que resolver antes importantes dificultades de índole técnica. Por ejemplo, la distancia de vuelo entre la cabeza y el disco deberá disminuir hasta 2 nanómetros, aproximadamente el tamaño de las moléculas del material lubricante depositado en el disco para disminuir la fricción, lo cual nos da una idea del impresionante reto técnico que ello supone.

Además de la capacidad de almacenamiento y del coste, otro parámetro importante en los dispositivos de grabación es la velocidad de acceso a los datos. Durante los últimos años, este parámetro ha ido aumentando a un ritmo más lento que la capacidad de almacenamiento debido a las limitaciones mecánicas en el movimiento de la cabeza y en la rotación del disco. La velocidad sería mucho mayor si, en vez de acceder a la información mecánicamente, se hiciera electrónicamente, es decir, mediante corrientes eléctricas, tal y como ocurre en las memorias semiconductoras.

Desde hace unos años se están investigando los discos duros cuantizados de acceso electrónico; se trata de chips de memoria en los que la celda elemental no es un transistor (memoria de acceso aleatorio SRAM) o un condensador (memorias DRAM), sino una partícula magnética. Estos dispositivos o memorias magnéticas se conocen con el nombre de MRAM (memoria de acceso aleatorio magnética). Aunque todavía están en fase de desarrollo, se les pronostica un gran impacto en el mercado dentro de unos años. Frente a las memorias tradicionales (SRAM y DRAM), las MRAM, pueden llegar a ser tan rápidas como ellas y, sin embargo, poseen mayor capacidad de almacenamiento, son no volátiles (la información no se borra cuando se desconectan), consumen menos y son más resistentes. Por todo ello, es muy probable que dentro de pocos años los ordenadores dispondrán de un chip MRAM sustituyendo a la memoria de acceso aleatorio y al disco duro actuales.

LUIS LÓPEZ DÍAZ
Departamento de Física Aplicada,
Universidad de Salamanca

Venenos de serpientes

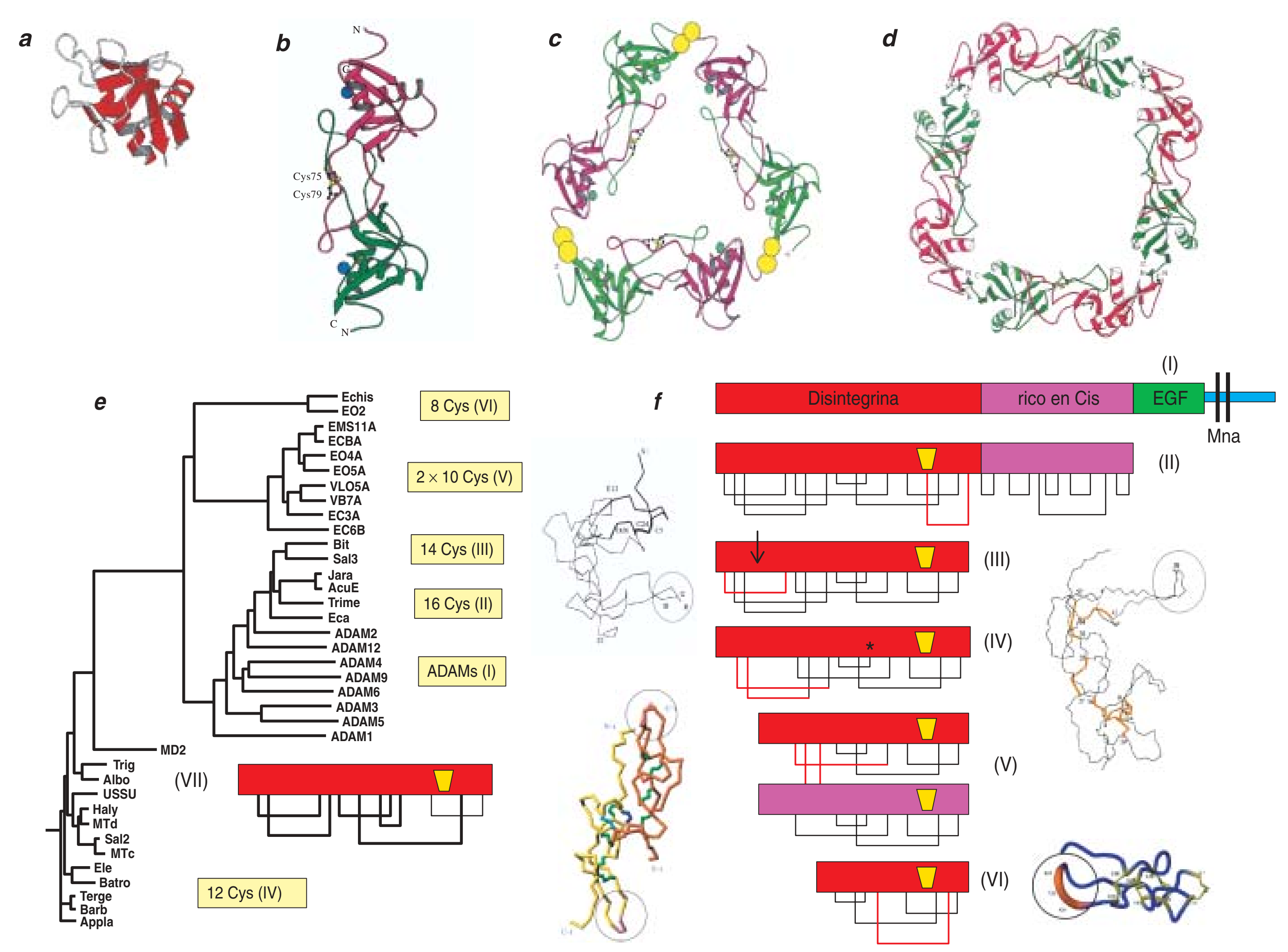
Diversificación estructural de proteínas ancestrales

Los venenos de serpientes contienen mezclas complejas de substancias farmacológicamente activas. Por sus efectos predominantes pueden catalogarse en venenos neurotóxicos y hemorrágicos.

El estudio de venenos neurotóxicos de serpientes de la familia *Elapidae* (serpiente de coral, cobra) ha llevado al descubrimiento de toxinas que bloquean, con alta especificidad, canales iónicos y receptores del sistema neuromuscular. Comparten estas propiedades con las conotoxinas de moluscos marinos y con las neurotoxinas de escorpiones, arañas y otros, con las que no comparten similitud de secuencia. Ello ha permitido utilizarlas como herramientas muy útiles en bioquímica y fisiología.

Los venenos hemorrágicos de serpientes de la familia *Viperidae* (serpientes de cascabel), además de diversas actividades enzimáticas pro y anticoagulantes, contienen proteínas que impiden el proceso de adhesión celular y la hemostasia. Producen mionecrosis, daño vascular y hemorragia. Dichas proteínas se reducen a tres clases principales: proteínas compuestas por dominios tipo lectina-C, Zn^{2+}-metaloproteasas y disintegrinas.

Los dominios de lectina-C son módulos estructurales que encontramos en proteínas animales de toda la escala filogenética. Algunos de estos dominios unen carbohidratos



Diversificación estructural de proteínas en venenos de serpientes. Esquema de la estructura de un dominio de lectina-C de la proteína humana MBP (a) *y de las proteínas de venenos de las serpientes* Trimeresurus flavoviridis (b, *inhibidor de los factores de coagulación IX y X; y* d, *flavocetina-A, que se une a la glicoproteína Ib y bloquea la agregación plaquetaria), y* Crotalus durissus terrificus (c, *convulxina, potente activador de la agregación plaquetaria) constituidas por asociaciones de heterodímeros α y β* (b) *unidos cabeza-cola por enlaces disulfuro (representados por bolas amarillas en* c, *pero omitidos en* d *para simplificar la figura).* e) *Arbol filogenético de las diferentes subfamilias de disintegrinas, cuya estructura modular y esquema de enlaces disulfuro se muestra en* f. *Las disintegrinas de venenos de serpientes se originan por procesamiento proteolítico de proteínas modulares tipo ADAM (I) que contienen un dominio N-terminal de Zn^{2+}-metaloproteasa. Este dominio se ha omitido en los esquemas* f(I)-f(VI). *Las estructuras* (I)-(VI) *muestran en rojo los enlaces disulfuro que sucesivamente se pierden por mutación o delección génica, generando las diversas subfamilias de disintegrinas. Se muestran las estructuras tridimensionales (obtenidas por resonancia magnética nuclear) de disintegrinas de los grupos* III-VI. *Los conos amarillos indican la posición de las secuencias de unión a integrinas en los dominios de disintegrina y los círculos señalan su ubicación en las estructuras tridimensionales. La flecha en* (III) *indica la posición de la cisteína extra responsable de la formación de homodímeros de la disintegrina bilitoxina. El asterisco en* (IV) *señala la cisteína ausente en la estructura de la disintegrina MD2 del veneno de* Deinagkistrodon acutus. (VII), *esquema de la disintegrina albolabrina de* Trimeresurus albolabris *mostrando en trazo grueso los enlaces disulfuro que no están conservados en las otras disintegrinas de su grupo*

y forman parte de la estructura de proteínas mosaico. (Se incluyen aquí adhesinas bacterianas, lectina MBP del suero que participan en la respuesta no inmunitaria contra los patógenos y otras.)

En cambio, los dominios de lectina-C de venenos de serpientes no unen azúcares, sino que han desarrollado actividades biológicas que afectan a factores de coagulación o plaquetarios. La función desempeñada en concreto dependerá de la estructura cuaternaria, cuya presentación más básica corresponde a la constituida por dominios α y β (similares pero no idénticos) enlazados por un puente disulfuro.

La adquisición, en el curso evolutivo, de cisteínas en los extremos amino y carboxilo de las subunidades α y β produjo una diversificación estructural basada en ingeniería de enlaces disulfuro. En virtud de

esta estequiometría, los heterodímeros $\alpha\beta$ se asocian cabeza-cola para formar polímeros de complejidad creciente que presentan diferentes actividades biológicas (*véase la figura*).

Las disintegrinas, una familia de polipéptidos de 40-100 aminoácidos, remedan (antagonizan) las funciones de receptores de adhesión celular de las integrinas. Como muchas otras toxinas de bajo peso molecular (neurotoxinas, defensinas antimicrobianas de insectos, tioninas de defensa frente a insectos fitófagos del endospermo de gramíneas, etcétera), la estructura de las disintegrinas está definida por un cuerpo globular fuertemente tramado mediante enlaces disulfuro. De ese cuerpo sobresalen bucles, uno de los cuales presenta en su ápice la secuencia de unión a integrinas.

A la variabilidad estructural del bucle se debe, en buena medida, la selectividad de inhibición de las disintegrinas. Dicha variabilidad viene generada por la acumulación de mutaciones, que actúan bajo presión de la selección natural, basada en el éxito depredador y reproductivo.


Agkistrodon bilineatus

La estrategia evolutiva fundada en ingeniería de enlaces disulfuro se ha desarrollado también en la familia de las disintegrinas. Si bien en éstas la diversificación estructural implica la pérdida selectiva de cisteínas. Las proteínas más antiguas que contienen un dominio de disintegrina son las de la familia ADAM [f(I)]. Estas proteínas integrales de la membrana plasmática celular, cuya presencia se observa en una gama amplia de organismos, desde nemátodos hasta vertebrados superiores, muestran una estructura modular. En la misma figuran dominios de Zn^{2+}-metaloproteasa, disintegrina con 8 enlaces disulfuro, rico en cisteínas, EGF, transmembrana y citoplasmático.


Crotalus durissus terrificus

Se debate qué funciones cumplen los dominios de disintegrina de las ADAM. Cabe presumir que, en la mayoría de los más de 30 miembros de la familia descritos hasta la fecha, los dominios extracelulares sólo sirvan de espaciadores para situar al dominio de metaloproteasa en la ubicación correcta de cara a la degradación de proteínas de membrana durante la embriogénesis y el desarrollo, gametogénesis, metástasis, etcétera.

Las proteínas de veneno de serpientes más similares a las ADAM son las metaloproteasas PIII [f(II)], que han perdido los dominios citoplásmico, transmembrana y EGF. Del análisis comparativo entre las secuencias de ADAM y las de PIII se desprende que estas últimas surgieron por evolución divergente de aquéllas con posterioridad a la separación de aves y reptiles, hace unos 350 millones de años.

La diversidad de estructuras de disintegrinas presentes en venenos de serpientes tiene su origen en procesos de duplicación génica, a los que siguieron mutaciones y delecciones en el ADN de los genes duplicados. Dado que los venenos de diferentes especies de serpientes contienen complementos distintivos de disintegrinas, se hace difícil identificar la relación causal que vincula evolutivamente a las diferentes subfamilias de disintegrinas.


Deinagkistrodon acutus

Sin embargo, del estudio de los genes y de la estructura de diversas disintegrinas resulta inmediato que la pérdida por mutación de pares de cisteínas enlazadas por un puente disulfuro, así como delecciones de regiones del ADN genómico que codifican a segmentos que contienen cisteínas, generaron todos los tipos de disintegrinas [f(II-VI)] conocidos.

De esa norma se exceptúa la disintegrina bilitoxina de *Agkistrodon bilineatus*; en vez de perder, ha adquirido una cisteína extra y forma homodímeros de cadenas polipeptídicas con 15 cisteínas. Otras estructuras singulares son las disintegrinas MD2, que contiene 11 cisteínas y probablemente represente un nuevo modo de dimerización, y albolabrina, cuyo patrón de enlaces disulfuro difiere del que caracteriza a las otras disintegrinas de su grupo. Es previsible que el estudio sistemático de venenos de serpientes revele otras estrategias de diversificación estructural, así como disintegrinas con nuevas especificidades de unión a integrinas.


Trimeresurus albolabris

JUAN JOSÉ CALVETE
y M. PAZ MORENO MURCIANO
Laboratorio de Biología
Estructural y Proteómica,
Instituto de Biomedicina
de Valencia
CEZARY MARCINKIEWICZ
Colegio de Ciencia y Técnica
de la Universidad Temple
Philadelphia

De cerca

Texto y fotos: Mercedes Conradi, Pablo J. López, César Megina, Estefanía Rodríguez, Robert J. Díaz, Neus Vert y Josep-Maria Gili

Los orígenes de la fauna bentónica antártica

El origen de la fauna antártica continúa atrayendo la atención de la comunidad científica. Entre las regiones australes de nuestro planeta, el arco de Escocia y mar de Weddell comparten una de las más complicadas historias tectónicas. Esta dinámica ha propiciado una rica y cambiante variedad de hábitats y condiciones ambientales para los organismos marinos en el curso del tiempo.

La disgregación de Gondwana, con el aislamiento consiguiente de la Antártida, los cambios climáticos con períodos intermitentes de calentamiento global —influidos por los ciclos de Milankovitch—, junto a los cambios en el nivel de los mares, sirven de marco para entender la migración de especies hacia la región antártica y desde ésta. Movimientos de especies que determinan los procesos y límites de distribución en las faunas.

Mientras que la formación del mar de Weddell comenzó en el Jurásico (hace 165 millones de años), el istmo continental entre Sudamérica y la Antártida persistió hasta hace algo más de 20 millones de años. El corte de esa unión y la dispersión de sus fragmentos continentales permitió la creación de la corriente circumpolar, causando el aislamiento climático y geográfico de la Antártida. De los restos continentales del antiguo istmo, unos forman hoy muchas de las islas del Arco de Escocia; otros constituyen islas submarinas 1000 m bajo el nivel del mar.

Se supone que, durante el Cenozoico, la capa de hielo, que cubrió el que ahora conocemos como continente helado, no se extendió en profundidad lo suficiente como para erradicar la fauna de plataforma en la Antártida. Además, las periódicas extensiones de la cubierta de hielo favorecieron procesos de especiación sobre la plataforma continental, que se convirtió en auténtica “fuente de diversidad” antártica.

La herramienta más adecuada en estudios de biología evolutiva y origen zoogeográfico de los distintos grupos animales es el análisis filogenético. El registro fósil facilita el reconocimiento de los caracteres primitivos y derivados, en los que dicho método se basa. Este registro ofrece sólo información para determinados grupos. Abundan fósiles de moluscos y crustáceos decápodos, pero ninguna de estas especies perdura hoy día en la Antártida. En cambio, escasean formas fosilizadas de grupos frecuentes en la Antártida, caracterizados por un alto grado de endemismo y que radiaron en los océanos del sur: esponjas, cnidarios, ascidias, ofiuras, picnogónidos y crustáceos peracáridos.

Para explicar el origen de la fauna antártica actual se barajan tres hipótesis. La primera de ellas, que nos remonta al Cretácico, cuando la Antártida formaba parte de Gondwana, propone que, parte de la fauna actual podría haber evolucionado a partir de un stock de fauna cretácica. Avalarían esta hipótesis los resultados obtenidos en investigaciones sobre biodiversidad y zoogeografía de algunos grupos taxonómicos de la fauna vágil (gasterópodos e isópodos) y de la fauna sésil. De acuerdo con la segunda hipótesis, el origen de la fauna antártica se halla en la colonización de la fauna de aguas profundas de los océanos que circundan el continente helado. Respaldan esa idea otros trabajos centrados en Tanaidáceos, Anfípodos, Moluscos y Antozoos. Por último, la tercera hipótesis atribuye el origen de la fauna antártica actual a la colonización desde la región magallánica a través del pasaje de Drake o a lo largo de las Islas del Arco de Escocia, hasta arribar a la península Antártica. Distintas especies de cnidarios bentónicos, entre otros grupos de invertebrados, avalan esta hipótesis. Probablemente las tres posibilidades hayan influido, en mayor o menor medida, en la aparición de la fauna antártica actual.

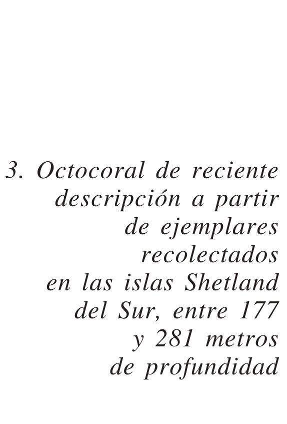


1. Captura realizada en las islas Shetland del Sur a 184 metros de profundidad. Muestra una fauna compuesta fundamentalmente por estrellas de mar, anémonas, moluscos y ofiuras



2. Anémona con la base adaptada a la vida en los fondos blandos, recogida en la campaña ANDEEP-II a 2290 metros de profundidad





3. Octocoral de reciente descripción a partir de ejemplares recolectados en las islas Shetland del Sur, entre 177 y 281 metros de profundidad

4. Octocoral del género Kophobelemnon *recogido a 5191 metros de profundidad en las islas Shetland del Sur y que porta una anémona simbionte*



5. Fotografía realizada a 140 metros de profundidad. Nos ofrece una comunidad bentónica con ofiuras, pulpos y peces, entre otros organismos



6. Fotografía realizada a 3948 metros. Este crinoideo de pedúnculo constituye un habitante típico de aguas profundas



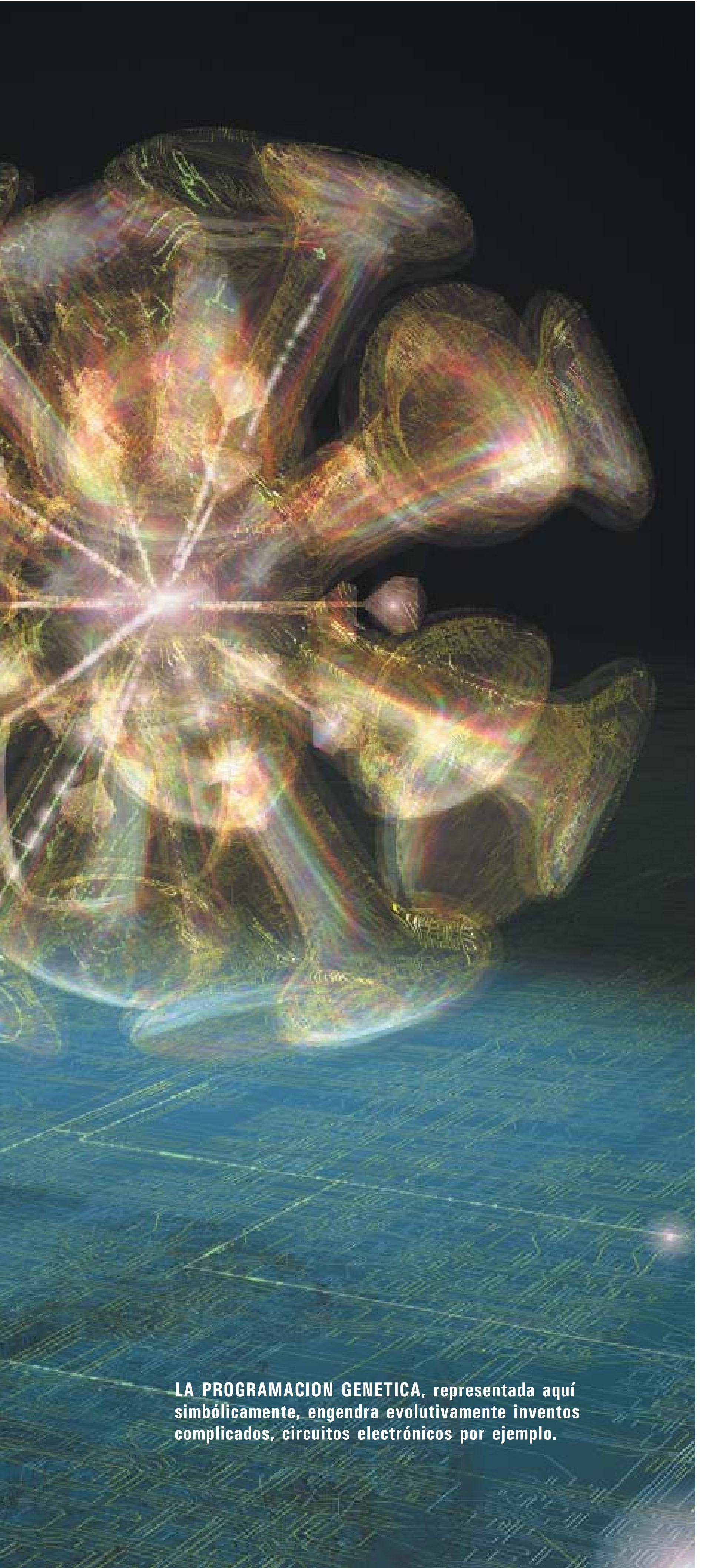
Invención por evolución

Programas de ordenador que funcionan por evolución darwinista están creando inventos nuevos y útiles. Merecen patentarse

John R. Koza, Martin A. Keane y Matthew J. Streeter

La evolución constituye un proceso creativo de inmensa potencia. Ha producido maravillas de complejidad inimaginable, sea la intrincada bioquímica de las células individuales o la elaborada estructura del cerebro humano. La evolución actúa con unos pocos procesos simples, a saber, la mutación, la recombinación sexual y la selección natural, procesos que itera durante muchas generaciones. En nuestros días, programas de ordenador sacan partido de versiones informáticas de estos mismos procesos para crear máquinas inteligentes. El procedimiento, denominado programación genética, ha permitido el diseño de programas informáticos y circuitos electrónicos capaces de realizar funciones específicas.

La programación genética ha reproducido 15 inventos electrónicos patentados con anterioridad, entre ellos varios que fueron calificados de fundamentales en sus respectivos campos cuando fueron dados a conocer (*véase el recuadro* "Inventos patentados que se han recreado mediante ordenador"). Seis de estos 15 inventos habían sido patentados por grandes instituciones de investigación con fecha posterior a enero de 2000, signo de que corresponden a las fronteras actuales de la investigación en dominios de importancia científica y práctica.



LA PROGRAMACION GENETICA, representada aquí simbólicamente, engendra evolutivamente inventos complicados, circuitos electrónicos por ejemplo.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

Algunos de los inventos producidos automáticamente coinciden de lleno con las especificaciones exactas de los inventos ya patentados. Otros constituyen inventos nuevos en la medida en que reproducen la funcionalidad del dispositivo ya existente mediante procedimientos distintos. Uno de estos inventos es claramente superior a su predecesor.

La programación genética ha clasificado secuencias proteínicas. Ha obtenido resultados a la altura de los conseguidos por los seres humanos en el diseño de antenas, en algoritmos matemáticos y en reguladores universales (*véase el recuadro* "Otras creaciones que compiten con las de los seres humanos"). Hemos solicitado hace poco una patente para un regulador universal que supera a los concebidos con los medios matemáticos de uso habitual en la industria.

Puede que el primer campo donde la programación genética encuentre aplicación comercial práctica sea el de los proyectos. Los ingenieros se ocupan, en esencia, de proyectar. Tampoco hace otra cosa la evolución. La tarea resulta especialmente adecuada para la programación genética: plantea problemas difíciles a los que se buscan soluciones excelentes, pero no matemáticamente perfectas; además, al proyectar no queda más remedio que componer delicados compromisos entre consideraciones opuestas y resulta difícil prever cuál será el equilibrio óptimo entre los diversos factores a tener en cuenta; por último, el diseño suele entrañar el hallazgo de disposiciones topológicas de las cosas (frente a la mera optimización de un conjunto de números), ejercicio que la programación genética realiza muy bien.

Los ingenieros tienden a examinar los problemas de maneras muy determinadas, a menudo basadas en modelos matemáticos ideales. La programación genética ofrece la ventaja de que no se encauza por estrechos canales de pensamiento. La evolución nada sabe de los aspectos matemáticos subyacentes; procura, sencillamente, producir una serie de resultados cada vez mejores. Así, no pocas veces vemos surgir del proceso evolutivo resultados originales que jamás se les hubieran ocurrido a los proyectistas.

La sopa primordial

Con independencia del campo de que se trate, en la programación genética se parte de una sopa primordial de "organismos" de ensayo, generados al azar, más una descripción de "alto nivel" de la función que se pretende cumplan esos organismos —los criterios para valorar su adecuación—. A título de ejemplo, sean los organismos funciones matemáticas elementales y propongámonos hallar una función cuya gráfica coincida con una curva dada. Los organismos estarán compuestos en este caso por constantes numéricas y operaciones primitivas, como la adición, sustracción, multiplicación y división. La adecuación de una función se determinará por el ajuste entre su gráfica y la curva diana.

El programa genético evalúa la adecuación de cada una de las funciones matemáticas que constituyen la población. Como es obvio, las funciones iniciales, creadas al azar, se ajustarán muy poco a la curva diana; aun así, algunas lo harán más que otras. El programa genético tiende a eliminar de la población a las funciones peor adaptadas y aplica operaciones genéticas a las funciones supervivientes, a fin de que engendren descendencia. La operación genética más importante es la reproducción sexual, o cruzamiento, que aparea a los organismos mejor adaptados para engendrar descendencia integrada por material genético tomado de ambos progenitores (*véase el recuadro* "Selección artificial"). Por ejemplo, el apareamiento de las funciones $(a + 1) - 2$ y $1 + (a \times a)$ podría resultar en que el término $(a + 1)$ de la primera función reemplazase a una a de la segunda, produciendo la descendencia $1 + [(a + 1) \times a]$. Al recombinar de este modo rasgos de dos organismos un poco adaptados nace, a veces, una descendencia que se adapta mejor.

Además de la reproducción sexual, la programación genética traslada sin alteración a la generación siguiente alrededor de un 9 por ciento de los individuos más idóneos; así se garantiza que los individuos más aptos de cada generación lo sean al menos tanto como los de la generación precedente. Por último, alrededor de un 1 por ciento de los programas experimentan mutaciones; por ejemplo, un término $a + 2$ podría mutar en el $(3 \times a) + 2$, con la esperanza de que una modificación aleatoria de un programa hasta cierto punto válido pueda llevar a un perfeccionamiento.

Estas operaciones genéticas van creando poco a poco una población mejorada de funciones matemáticas. El aprovechamiento de pequeñas diferencias en la adecuación da origen a importantes mejoras en el transcurso de muchas generaciones, de igual modo que un tipo de interés bajo ocasiona una plusvalía grande cuando se opera durante decenios a interés compuesto.

Podemos concebir el proceso evolutivo como una búsqueda en el espacio de todos los organismos posibles. La búsqueda más creativa es la operación de cruzamiento; por eso la utilizamos para engendrar alrededor del 90 por ciento de la descendencia de cada generación (*véase el recuadro* "Selección artificial"). La mutación, por el contrario, tiende a efectuar una búsqueda local que trata de hallar mejoras en la cercanía de los individuos útiles existentes ya. A nuestro juicio, una tasa de mutación demasiado alta da por resultado una evolución menos eficiente, salvo en el caso de problemas particularmente sencillos.

Veamos un ejemplo más elaborado que el de la función matemática: la evolución de un programa de ordenador que se vale de iteraciones y memorias para clasificar secuencias proteínicas. En este caso, la programación genética llevará a cabo procesos análogos a los procesos biológicos de duplicación o supresión de genes: la creación o eliminación de subrutinas, iteraciones, bucles y recurrencias en la población de programas que va evolucionando. El propio proceso evolutivo determina el carácter y el contenido del programa informático necesario para resolver el problema.

Un circuito de filtro de paso de bajos sirve como ejemplo de la manera en que la programación genética diseña circuitos electrónicos analógicos. En los equipos de alta fidelidad se utilizan filtros de paso de bajos para enviar sólo las frecuencias más bajas al altavoz de graves (el *woofer*). Para crear un filtro de paso de bajos mediante programación genética, el usuario (humano) especifica de qué componentes se dispone para construir el circuito (por ejemplo, resistencias, inductancias y condensadores) y define la adecuación de cada circuito candidato como el grado en que sólo deja pasar a plena potencia frecuencias de hasta 1000 Hz, mientras elimina todas las frecuencias superiores.

Los circuitos son generados por un procedimiento que toma prestados mecanismos de la biología del desarrollo. Cada circuito comienza siendo un "embrión" elemental, con-

Resumen/*Invención darwinista*

- La programación genética se sirve de una versión computarizada de la evolución para crear inventos nuevos. El método, que parte de millares de objetos de ensayo generados al azar, va seleccionando los individuos más aptos y aplica diversos procesos —mutaciones, recombinación sexual— para engendrar progenies sucesivas.
- A lo largo de docenas de generaciones, la población va gradualmente cumpliendo los criterios deseados en medida cada vez mayor. Al final de la ronda, se toma el individuo más idóneo como solución del problema planteado.
- Por lo que se refiere a la electrónica, la programación genética ha reproducido inventos patentados ya, algunos de los cuales se encuentran en la vanguardia de la técnica actual: antenas, algoritmos informáticos para la identificación de proteínas y reguladores de uso general. Algunos inventos obtenidos por evolución computarizada podrían merecer su propia patente.
- Consideramos que en las postrimerías del decenio en curso la potencia de cómputo disponible permitirá que los ordenadores personales aborden la programación genética y creen inventos que compitan en igualdad de condiciones con los ideados por seres humanos.

sistente en un conductor que conecta directamente la entrada con la salida. El circuito embrionario va creciendo por aplicación progresiva de funciones de construcción de circuitos. Algunas de ellas insertan componentes concretos. Otras modifican el esquema de conexionado entre los componentes; podrían, por ejemplo, duplicar una línea o componente existente ya, sea en serie o en paralelo, o crear una conexión desde un punto determinado hasta una fuente de alimentación, hasta tierra o hasta alguna otra parte del propio circuito en crecimiento. Este proceso de desarrollo proporciona tanto la topología del circuito como los valores numéricos que caracterizan los componentes. El sistema sintetiza circuitos automáticamente sin recurrir a ningún conocimiento de ingeniería eléctrica referente a la síntesis de circuitos.

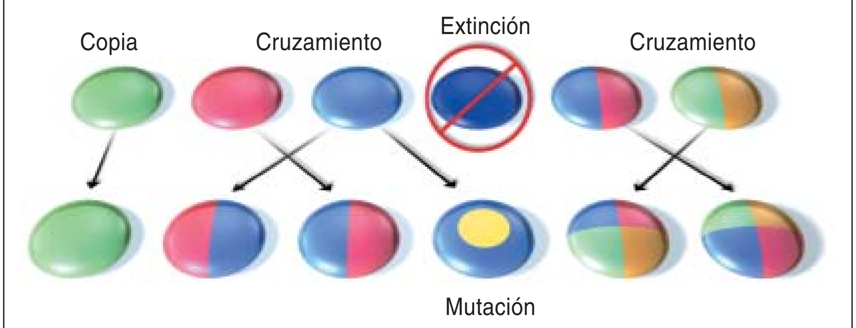
El comportamiento de la gran mayoría de la población inicial de circuitos rudimentarios generados al azar no se parecerá nada al de un filtro de paso de bajos. Unos pocos, sin embargo, intercalarán una inductancia entre la entrada y la salida del circuito, con lo que ofrecerán algún impedimento al paso de las frecuencias altas. Otros tendrán un condensador conectado entre la entrada y tierra, mermando la potencia de las frecuencias más altas (*véase el recuadro* "Obtención evolutiva de un filtro de paso de bajos"). Se seleccionará a estos circuitos para que se apareen con mayor frecuencia que otros; con el tiempo, las generaciones posteriores contendrán descendientes que posean ambas características. Las operaciones de cruzamiento y de mutación, actuando sobre los valores de los componentes, irán ajustándolos hasta que la frecuencia de corte se aproxime a los 1000 Hz deseados. Otros cruces y mutaciones irán eliminando resistencias, que disipan potencia. Cruzamientos adicionales duplicarán o triplicarán la combinación inductancia-capacidad, hasta generar la estructura en cascada que George A. Campbell, de AT&T, patentó en 1917.

Otros dispositivos se diseñan mediante combinaciones similares de procesos evolutivos. Las antenas, por ejemplo, se diseñan automáti-

SELECCION ARTIFICIAL

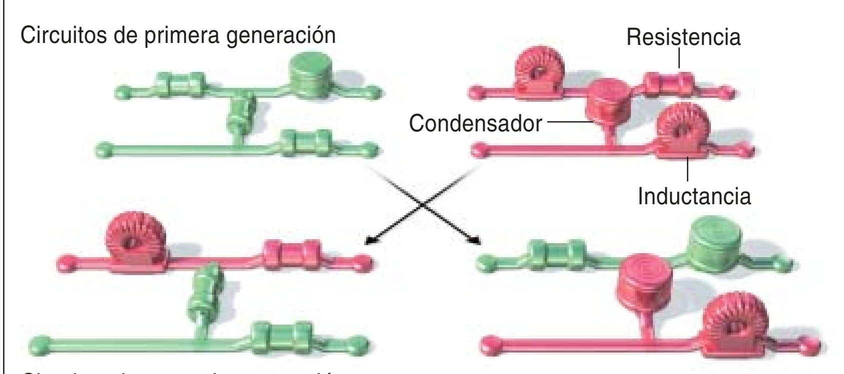
Procesos evolutivos

EN LA PROGRAMACIÓN GENÉTICA, tres son los procesos que propagan "organismos" (*representados aquí por discos coloreados*) de una generación a la siguiente. Algunos de los organismos más idóneos se copian sin modificación. A otros se los aparea para que se reproduzcan sexualmente —se los cruza—: en esta operación se intercambian partes y se engendra prole. Un pequeño porcentaje se altera por mutación. Los organismos no seleccionados para su propagación se extinguen. La operación de cruce es aplicada más frecuentemente que las de copia y de mutación, por su capacidad para reunir nuevas combinaciones de propiedades favorables en los organismos individuales.



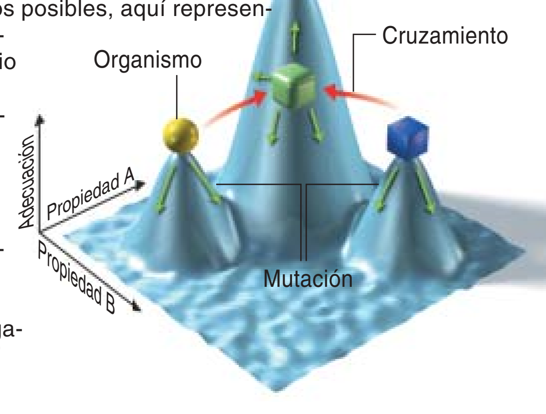
Cruzamiento electrónico

La operación de cruzamiento, al operar sobre circuitos electrónicos, toma dos circuitos e intercambia entre ellos algunos componentes, produciendo así dos circuitos nuevos.



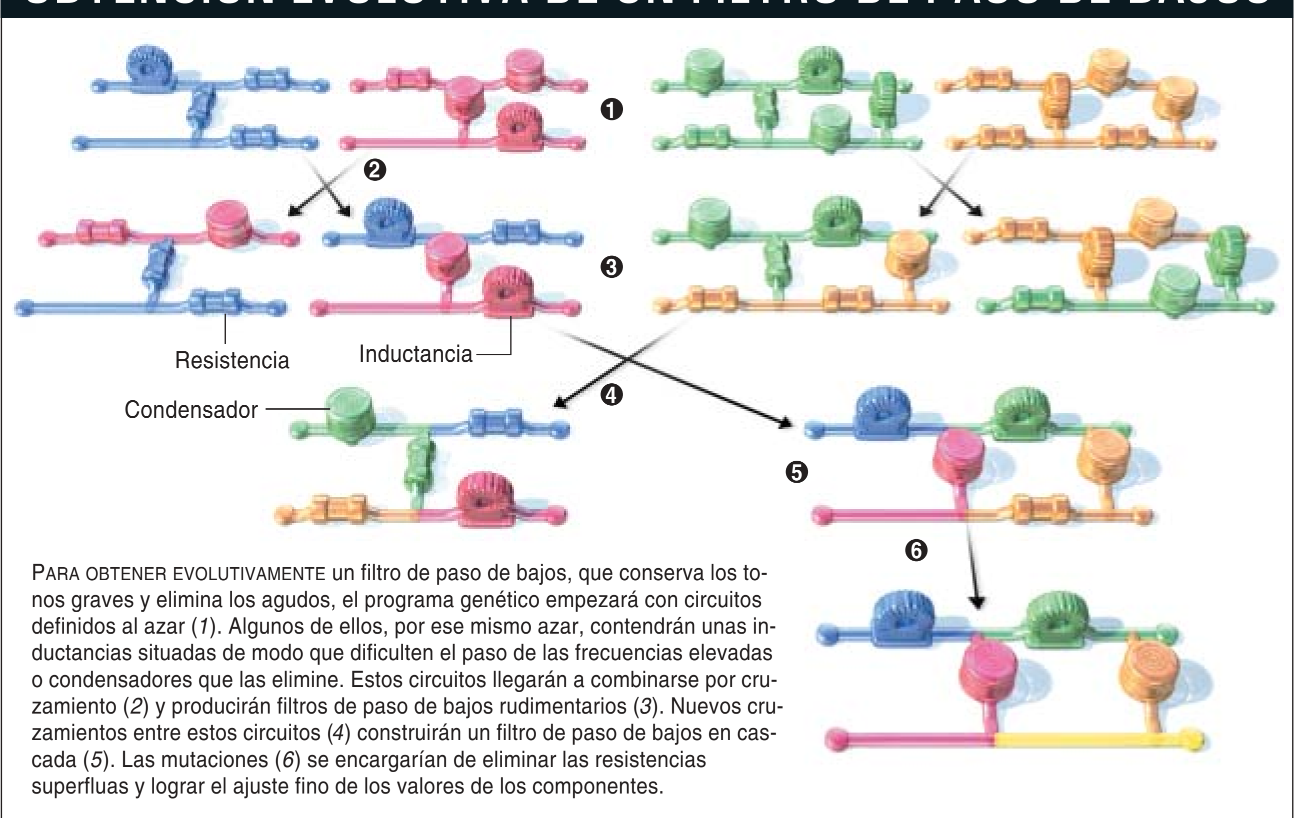
Comparación de cruzamiento y mutación

La evolución actúa como una búsqueda en el espacio de todos los organismos posibles, aquí representado por el plano. El cruzamiento explora este espacio de forma creadora, combinando en ocasiones características dispares pero convenientes, con lo que salta así a una nueva región, en la que residen organismos mucho más adecuados (*flechas rojas*). La mutación, por el contrario, tiende a hallar el mejor organismo entre los "cercanos" (*flechas verdes*).



BRYAN CHRISTIE DESIGN

OBTENCION EVOLUTIVA DE UN FILTRO DE PASO DE BAJOS



PARA OBTENER EVOLUTIVAMENTE un filtro de paso de bajos, que conserva los tonos graves y elimina los agudos, el programa genético empezará con circuitos definidos al azar (*1*). Algunos de ellos, por ese mismo azar, contendrán unas inductancias situadas de modo que dificulten el paso de las frecuencias elevadas o condensadores que las elimine. Estos circuitos llegarán a combinarse por cruzamiento (*2*) y producirán filtros de paso de bajos rudimentarios (*3*). Nuevos cruzamientos entre estos circuitos (*4*) construirán un filtro de paso de bajos en cascada (*5*). Las mutaciones (*6*) se encargarían de eliminar las resistencias superfluas y lograr el ajuste fino de los valores de los componentes.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

camente por medio de una "tortuga" que deposita (o no deposita) metal sobre una superficie plana, al tiempo que se desplaza y gira bajo el control de diversas operaciones (parecidas a las del lenguaje de programación LOGO).

Diferenciadores, integradores y amplificadores son los ingredientes primitivos utilizados para la creación automática de reguladores. El controlador de la velocidad de crucero de un automóvil ofrece un ejemplo de regulador básico: ha de reducir la alimentación de combustible si la velocidad es demasiado alta, o aumentarla si es demasiado lenta. Un regulador bien diseñado tendrá en cuenta los efectos diferidos de los cambios en la alimentación e irá supervisando sin cesar cómo varía la velocidad; así evitará que la corrección se exceda y no atine con la velocidad deseada. Gran importancia revisten los reguladores universales, adaptables a un amplio repertorio de tareas, que pueden consistir tanto en el control de un horno doméstico como en el de un proceso de fabricación o un brazo lector de disco duro de ordenador. Pequeños perfeccionamientos en las reglas de ajuste utilizadas para adaptar un controlador a su tarea pueden dar por resultado economías considerables.

Un regulador de uso muy frecuente es el PID, inventado en 1939 por Albert Callender y Allan Stevenson, de Imperial Chemical Limited, una empresa británica. Los reguladores PID (iniciales que corresponden a sus secciones *p*roporcional, *i*ntegradora y *d*erivadora) se utilizan en un sinfín de aplicaciones. Nuestros programas genéticos han logrado, por evolución, dos claras mejoras en este campo. En primer lugar, han desarrollado un nuevo conjunto de reglas de ajuste de reguladores PID. Desde 1942 se venía utilizando un conjunto bastante sencillo y eficaz, perfeccionado en 1995. Nuestras reglas superan las de 1995. En segundo lugar, hemos obtenido, también evolutivamente, tres nuevas topologías de circuito, superiores de nuevo a los reguladores PID basados en las antiguas reglas de ajuste. Ya se ha presentado una solicitud de patente tanto de las topologías como del nuevo sistema de reglas. Si (como esperamos) nos es concedida, creemos que será la primera otorgada a un invento obtenido gracias a la programación genética.

Los autores

JOHN R. KOZA inventó en 1987 la programación genética. En la actualidad es profesor consultor del programa de informática biomédica de la facultad de medicina de la Universidad de Stanford, y profesor consultor del departamento de ingeniería eléctrica de esa misma universidad. MARTIN A. KEANE es científico jefe de Econometrics, Inc. MATTHEW J. STREETER trabaja en Genetic Programming, Inc.

Dispositivos informáticos evolucionables

Durante el proceso evolutivo debe evaluarse la adecuación de millares o millones de descendientes en cada generación. En el caso de los circuitos electrónicos, solemos valernos de programas ordinarios

de simulación de circuitos para predecir el comportamiento de cada circuito de la población. Sin embargo, en un importante y reciente campo técnico, el de los "dispositivos informáticos evolucionables", resulta posible configurar de forma instantánea microchips que materialicen cada uno de los circuitos de una ronda de programación genética.

Estos microcircuitos, o "matrices de puertas de programación por campos rápidamente reconfigurables", constan de millares de células idénticas, cada una de las cuales puede realizar numerosas funciones lógicas diferentes según sea programada. Unos conjuntos de bits de memoria ubicados en "el sótano" del chip permiten adaptar como se quiera cada célula para que realice una función lógica determinada. Otros bits de configuración programan las rutas de interconexión; autorizan así muchas formas distintas de vincular las células entre sí y con las patillas de entrada y salida del dispositivo. La "personalidad" del microcircuito (sus funciones lógicas y sus interconexiones) puede modificarse dinámicamente en pocos nanosegundos sin más que cambiar sus bits de configuración.

Una docena de firmas vende estos microcircuitos rápidamente reconfigurables, pero se destinan a sistemas digitales. Los dispositivos analógicos a la venta tienen unas prestaciones muy cortas. Nos hemos servido de un chip digital reconfigurable para crear una red de clasificación con un número menor de etapas que la versión inicialmente patentada.

Tiempos de ejecución

La evolución natural ha dispuesto de miles de millones de años de "tiempo de ejecución" para crear sus maravillas. La programación genética artificial de nada serviría si exigiese tanto tiempo. Una ronda de programación genética engendra una población de decenas o centenares de miles de individuos que van evolucionando a lo largo de decenas o centenares de generaciones. Una semana de funcionamiento en un ordenador portátil basta para producir la mitad de los resultados, capaces de competir con proyectos humanos, enumerados en el recuadro "Inventos patentados que se han recreado mediante ordenador"; sin embargo, los seis inventos patentados a partir del año 2000 exigen una potencia de cómputo muy superior.

En la naturaleza, la evolución medra cuando los organismos se encuentran repartidos en poblaciones semiaisladas. Otro tanto parece valer para la programación genética instalada en una red de ordenadores laxamente interconectados. Cada

Inventos patentados que se han recreado mediante ordenador

HASTA LA FECHA, la programación genética ha recreado 15 inventos, ya patentados por los creadores que aquí figuran.

INVENTO	AÑO	INVENTOR	INSTITUCION
FILTRO EN CASCADA	1917	George A. Campbell	AT&T, *Nueva York*
FILTRO DE CRUCE	1925	Otto Julius Zobel	AT&T
AMPLIFICADOR CON REALIMENTACION NEGATIVA	1927	Harold S. Black	AT&T
FILTRO ELIPTICO	1934-36	Wilhelm Cauer	Universidad de Gotinga, *Alemania*
REGULADOR PID (proporcional, integrador, derivador)	1939	Albert Callender y Allan Stevenson	Imperial Chemical Limited, *Northwich, Inglaterra*
REGULADOR POR DERIVADA SEGUNDA	1942	Harry Jones	Brown Instrument Company, *Filadelfia*
SECCION SEGUIDOR-EMISOR DARLINGTON	1953	Sidney Darlington	Bell Telephone Laboratories, *Nueva York*
CIRCUITO PHILBRICK	1956	George A. Philbrick	George A. Philbrick Researches, *Boston*
RED CLASIFICADORA	1962	Daniel G. O'Connor y Raymond J. Nelson	General Precision, *Los Angeles*
CIRCUITO HIBRIDO ANALOGICO-DIGITAL para producir un condensador variable	2000	Turgut Sefket Aytur	Lucent Technologies, *Murray Hill, Nueva Jersey*
CONVERTIDOR TENSION-INTENSIDAD	2000	Akira Ikeuchi y Naoshi Tokuda	Mitsumi Electric, *Tokio*
GENERADOR DE FUNCION CUBICA	2000	Stefano Cipriani y Anthony A. Takeshian	Conexant Systems, *Newport Beach, California*
CIRCUITO TRANSISTORIZADO DE BAJA TENSION Y GRAN INTENSIDAD para verificar fuentes de tensión	2001	Timothy Daun-Lindberg y Michael Miller	IBM, *Armonk, Nueva York*
CIRCUITO BALUN DE BAJA TENSION	2001	Sang Gug Lee	Universidad de Información y Comunicaciones, *Taejon, Corea*
FILTRO INTEGRADO ACTIVO SINTONIZABLE	2001	Robert Irvine y Bern Kolb	Infineon Technologies, *Munich, Alemania*

ordenador puede encargarse de evaluar la adecuación de los individuos de su subpoblación, tarea que lleva su tiempo. Después, al final de cada generación, un pequeño porcentaje de individuos (seleccionados según su adecuación) migra a los ordenadores contiguos de la red, con lo que cada una de las poblaciones semiaisladas se beneficia de los perfeccionamientos evolutivos que han tenido lugar en otros lugares.

Hemos construido una agrupación de ordenadores, a la manera del superordenador Beowulf, integrada por 1000 ordenadores Pentium a 350 megahertz, un poco anticuados ya [*véase* “El superordenador Beowulf,” por William W. Hargrove, Forrest M. Hoffman y Thomas Sterling; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2001]. Evalúa la aptitud individual de cada candidato, aun en los casos más complicados, que más tiempo llevan, en alrededor de 1 minuto. Una ronda con 100 generaciones de una población de 100.000 individuos puede quedar resuelta en el plazo aproximado de una semana.

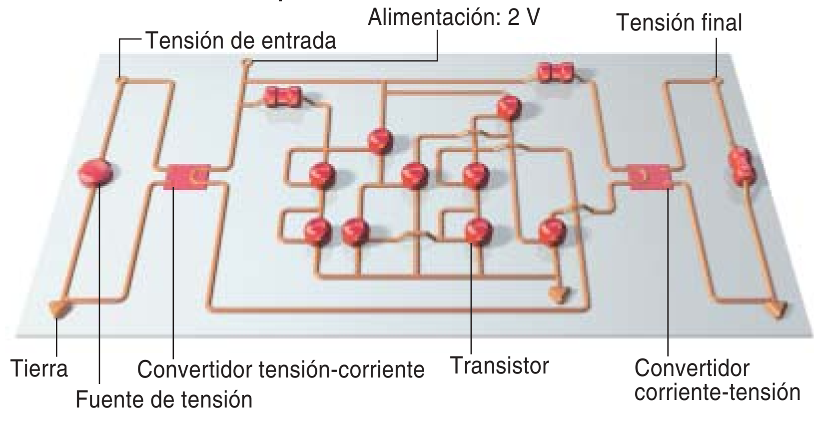
Los 1000 ordenadores efectúan en su conjunto unos 350.000 millones de ciclos por segundo. Aunque esta potencia de cómputo pueda parecer muy grande a primera vista, queda ensombrecida por el billón de células del cerebro humano (cada una de las cuales cuenta, según se cree, con unas 10.000 conexiones y opera al ritmo de 1000 operaciones por segundo).

Confiamos en que a finales de este decenio estén disponibles ordenadores de 50 gigahertz (50.000 millones de ciclos por segundo). Pondría la capacidad de obtener por evolución inventos merecedores de patentarse en manos de cualquiera que dispusiese de una estación de trabajo de precio moderado. Prevemos que la programación genética se utilizará de forma habitual como máquina de invención.

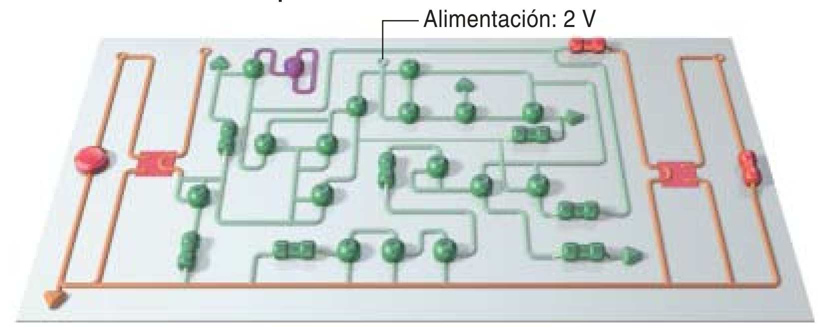
PERSONAS Y ORDENADORES

LOS DOS CIRCUITOS que aquí se muestran son generadores de función cúbica. El primero de los dos es un circuito patentado, un proyecto de un ser humano; las secciones de color verde y de color morado del segundo se obtuvieron evolutivamente mediante programación genética (las secciones restantes son etapas típicas de entrada y salida). El circuito obtenido evolutivamente funciona mejor que el de concepción humana, pero no sabemos *cómo* funciona. El circuito evolucionado no sólo es más complicado, sino que contiene también elementos redundantes, como el transistor de color morado, que no contribuye en nada a su funcionamiento.

Circuito de concepción humana



Circuito obtenido por evolución



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Un test de inteligencia

La programación genética reproduce sin mayores dificultades inventos humanos, ahora que hace medio siglo de que Alan M. Turing, uno de los pioneros de las ciencias de computación, pronosticase que se construirían máquinas que competirían con los seres humanos en unos 50 años. Las dos metodologías en boga en el mundo académico con que se ha tratado, a lo largo de estos 50 años, de satisfacer la predicción de Turing se valían una de la deducción lógica, la otra de bases de datos que acumulaban conocimientos y pericias de humanos (los llamados sistemas expertos). Este par de metodologías coincide en líneas generales con las dos grandes vías esbozadas por Turing en 1950. La primera —no sorprende a la luz de los trabajos de Turing del decenio de 1930 sobre los fundamentos lógicos de la computación— consistía en la ejecución de programas concebidos para analizar situaciones y problemas, y responder a ellas, por medios lógicos. La segunda, que Turing denominaba “búsqueda cultural”, aplicaba conocimientos y pericias tomados de expertos.

El objetivo de la inteligencia artificial y de las máquinas capaces de aprender consiste en lograr que los ordenadores resuelvan problemas a partir de una formulación en lenguaje de alto nivel de qué ha de hacerse. Con una mínima participación humana en cada nuevo problema y sin utilizar ni deducciones lógicas ni una base de datos de conocimientos humanos, la programación genética está suministrando

Otras creaciones que compiten con las de los seres humanos

ADEMÁS DE REPRODUCIR inventos ya patentados, la programación genética ha logrado resultados que serían el orgullo de un ser humano.

UN PROGRAMA DE FUTBOL, que quedó hacia la mitad de la clasificación cuando se enfrentó a 34 programas escritos por personas en la RoboCup de 1998

UN CIRCUITO ANALOGICO para el control óptimo de un robot en tiempo real

CUATRO ALGORITMOS para la identificación de segmentos de proteínas

DERIVACION DE MOTIVOS (secuencias de aminoácidos) para la identificación de ciertas familias de proteínas

ALGORITMOS PARA LA COMPUTACION CUANTICA que, en ciertos casos, resuelven los problemas mejor que cualquiera de los anteriormente publicados

UN CIRCUITO NO-Y para efectuar la negación de la conjunción de dos señales de entrada

CIRCUITOS COMPUTACIONALES ANALOGICOS para las funciones cuadrática, cúbica, raíz cuadrada, raíz cúbica, logarítmica y gaussiana

UN CIRCUITO CONVERTIDOR DE DIGITAL EN ANALOGICO

UN CIRCUITO CONVERTIDOR DE ANALOGICO EN DIGITAL

inteligencia maquinal capaz de competir con la de las personas.

Turing propuso también un célebre test para la inteligencia maquinal. En una reformulación muy utilizada del test de Turing, un juez recibe mensajes de una fuente que no puede ver y trata de determinar si proceden de una persona o de una máquina. No estamos afirmando que la programación genética haya alcanzado la capacidad de imitación general de la cognición humana que se asocia al test de Turing. Pero sí ha superado un examen de creatividad e ingenio que sólo un número no muy grande de seres humanos puede aprobar. La oficina de patentes de los EE.UU. lleva aplicando este examen hace más de 200 años.

La oficina de patentes recibe descripciones escritas de los inventos y juzga después si no le resultarían triviales a una persona provista de la pericia apropiada en el campo de que se trate. Cuando un método automatizado llega a reproducir un invento humano que ya está patentado, aprueba el test de inteligencia de la oficina de patentes. Que la versión original, concebida por una persona, superase en su momento los criterios de mérito de la oficina de patentes significa que el duplicado creado por el ordenador los habría satisfecho también.

Este test de inteligencia no se refiere a cháchara intrascendentes o de la destreza en un juego. Cuando una institución o un individuo dedica tiempo y dinero a inventar algo y emprende el lento y oneroso proceso de obtención de una patente, es que piensa que el trabajo tiene importancia científica o práctica. Además, la oficina de patentes exige que el invento propuesto sea útil. Los inventos patentados constituyen trabajos nada triviales, realizados por seres humanos dotados de una capacidad de creación excepcional.

Pudiera resultar sorprendente que se haya llegado a una inteligencia maquinal tal, que sea corriente que compita con la humana, pese a no haber utilizado para ello más que métodos indeterministas y no haber recurrido a la lógica ni a conocimientos ya adquiridos. Pero no habría sido Alan Turing quien se sorprendiera. En su artículo de 1950, expuso también esta tercera vía hacia la inteligencia artificial: "La exploración genética o evolutiva en la que se busca una combinación de genes y el criterio es el valor de supervivencia."

Turing no especificaba la forma de realizar una "exploración genética o evolutiva" destinada a lograr inteligencia maquinal, pero sí señaló lo siguiente:

> No podemos esperar hallar una buena máquina hija al primer intento. Es preciso experimentar, enseñar a la máquina hija y ver en qué medida aprende. Se puede entonces probar con otra y ver si es mejor o peor. Existe una relación evidente entre este proceso y la evolución, según las identificaciones
>
> Estructura de la máquina hija
> = Material hereditario
> Cambios en la máquina hija
> = Mutaciones
> Selección natural
> = Juicio del experimentador

La programación genética ha cumplido de múltiples maneras las esperanzas puestas en esa tercera vía que propuso Turing para alcanzar la inteligencia maquinal.

Bibliografía complementaria

COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE. Alan M. Turing en *Mind*, vol. 59, n.º 236, páginas 433-460; octubre de 1950. Disponible en www.abelard.org/turpap/turpap.htm por autorización de Oxford University Press.

GENETIC PROGRAMMING: ON THE PROGRAMMING OF COMPUTERS BY MEANS OF NATURAL SELECTION. John R. Koza. MIT Press, 1992.

GENETIC PROGRAMMING: THE MOVIE. John R. Koza y James P. Rice. MIT Press, 1992.

GENETIC PROGRAMMING II: DARWINIAN INVENTION AND PROBLEM SOLVING. John R. Koza, Forrest H. Bennett III, David Andre y Martin A. Keane. Morgan Kaufmann, 1999.

GENETIC PROGRAMMING III: VIDEOTAPE: HUMAN-COMPETITIVE MACHINE INTELLIGENCE. John R. Koza, Martin A. Keane y Scott Brave. Morgan Kaufmann, 1999.

GENETIC PROGRAMMING IV: ROUTINE HUMAN-COMPETITIVE MACHINE INTELLIGENCE. John R. Koza, Martin A. Keane William Midlowec, Jessen Yu y Guido Lanza. Kluwer Academic Publishers (en prensa).

Malformaciones en anfibios

Una investigación llevada a cabo durante los últimos ocho años sobre el aumento alarmante de casos de malformaciones en anfibios ha aclarado el papel de los tres principales factores implicados

Andrew R. Blaustein y Pieter T. J. Johnson

Un caluroso día del verano de 1995 ocho estudiantes capturaban ejemplares de rana leopardo (*Rana pipiens*) en una charca cerca de Henderson, en el estado de Minnesota, para realizar un estudio básico de ecología de humedales. Para su asombro, las ranas atrapadas presentaban cinco o más patas traseras, algunas de ellas retorcidas de forma esperpéntica. De los veintidós animales que capturaron aquel día, la mitad mostraba serias malformaciones. Un seguimiento llevado a cabo por los técnicos de control de contaminación añadió más ejemplares al grotesco inventario. Algunas ranas de esa charca no tenían extremidades posteriores o, en su lugar, presentaban tan sólo muñones; a otras les salían una o dos patas del abdomen. Unas pocas carecían de un ojo.

El hallazgo planteaba numerosas preguntas. ¿Se trataba de un hecho aislado o se inscribía en un fenómeno más general? Conforme los investigadores iban abordando las poblaciones de anfibios locales en diferentes puntos del país, quedaba patente que ese extraño inventario de malformaciones no se limitaba a Minnesota. Desde 1995 se han documentado malformaciones en más de 60 especies, salamandras y sapos incluidos, en 46 estados de la Unión. En algunas poblaciones locales el porcentaje de individuos afectados alcanza el 80 %. Se ha confirmado la existencia del mismo fenómeno en otros países. Así, se han encontrado cifras sorprendentes de anfibios con malformaciones en Asia, Europa y Australia. A escala planetaria, la falta de extremidades o la presencia de extremidades supernumerarias constituye algo corriente.

Estas aberraciones no pueden considerarse un fenómeno normal en la vida de los anfibios. A comienzos del siglo XX se demostró que, en cada población, aparecían unos pocos individuos con defectos originados por mutaciones genéticas, heridas o alteraciones del desarrollo. Sin embargo, en poblaciones sanas, no llega al 5 % el número de los ejemplares privados de dedos o de extremidades; menos frecuentes incluso resultan las malformaciones más extremas, como la presencia de extremidades supernumerarias. Y lo que reviste mayor importancia, una revisión reciente de datos históricos llevada a cabo por uno de los autores (Johnson), junto con nuevos datos de campo, demuestran que aumenta la magnitud del fenómeno de las malformaciones.

En los últimos ocho años, la investigación ha venido vinculando el aumento de los casos de malformaciones con la mayor exposición frente a la radiación ultravioleta que sufren los anfibios, con el vertido de contaminantes químicos en el agua o con epidemias de parásitos. Como suele suceder, a medida que se han ido publicando los resultados de un nuevo estudio, los medios de comunicación le han otorgado mayor importancia a la novedad, ofreciendo así una idea engañosa de la situación. Probablemente, todos esos factores se hallan implicados en mayor o menor medida, produciendo cada uno efectos característicos; en algunos casos, actúan los tres a un tiempo. Añádase el origen antropogénico de todos ellos, expresado en la alteración de hábitats naturales.

Sin duda, las malformaciones minan la supervivencia de los anfibios; resulta, además, muy verosímil su responsabilidad en las drásticas caídas de población, un motivo de grave preocupación global desde 1989

1. PATAS PREOCUPANTES. El ecólogo Andrew R. Blaustein observa ejemplares de ranitas arborícolas del Pacífico (*Hyla regilla*) con malformaciones, colectadas en charcas del noroeste del estado de Oregón.

FRANS LANTING *Minden Pictures*



[*véase* "Declive de las poblaciones de anfibios", por Andrew R. Blaustein y David B. Wake; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1995]. Ambas tendencias son preocupantes en sí mismas y constituyen un aviso para todo el planeta. Desde hace tiempo los anfibios se vienen considerando importantes indicadores de la salud de la Tierra porque sus huevos sin protección y su piel permeable les hacen ser extremadamente sensibles ante las alteraciones del medio. Todo parece indicar que los factores que están afectando seriamente a los anfibios también están comenzando a cobrarse víctimas en otros grupos.

Las primeras sospechas

Casi desde el mismo instante en que se descubrieron las malformaciones comenzó a culparse de las mismas a la exposición excesiva frente a la radiación ultravioleta. Por una doble razón: se había probado ya su implicación en declives de poblaciones de anfibios y había quedado demostrada en ensayos de laboratorio su capacidad para alterar el desarrollo normal de tales organismos. Este tipo de radiación —que daña el sistema inmunitario y produce mutaciones genéticas, entre otros efectos— llega a la Tierra en cantidades sin precedentes desde que los clorofluorocarburos y otros productos químicos creados por el hombre debilitaron el espesor de la capa protectora de ozono de la estratosfera, un problema sobre el que se dispone de datos desde comienzos de los años setenta. Entre 1994 y 1998, el otro autor (Blaustein) demostró, con su grupo, que la exposición directa a la radiación ultravioleta podía matar embriones y larvas de anfibios, además de provocar daños graves en los ojos de ejemplares adultos e inducir malformaciones de varios tipos en ranas y salamandras.

Para saber si la exposición a la radiación ultravioleta podía alterar el desarrollo normal de las extremidades posteriores hubo que esperar hasta finales de los noventa. Por esas fechas, el equipo encabezado por Gary Ankley, de la Agencia de Protección Ambiental de Minnesota, acometió el experimento más ceñido a la resolución de la cuestión de cuantos se habían realizado hasta entonces. Cuando los investigadores protegían de la radiación ultravioleta a los anfibios en desarrollo, sus extremidades posteriores se formaban de manera normal; ahora bien, las larvas que se dejaban expuestas a dosis naturales de radiación ultravioleta se desarrollaban sin parte de sus patas traseras o sin algunos dedos. Estas anomalías recordaban a algunas de las que se habían encontrado en ranas capturadas en condiciones naturales en diversos puntos de los Estados Unidos.

Sin embargo, el grupo de la Agencia de Protección Ambiental se dio cuenta inmediatamente de que no podía atribuirse a la radiación ultravioleta todos los casos de malformaciones en las patas posteriores que se encuentran en la naturaleza. En particular, no produce la formación de extremidades supernumerarias, una de las malformaciones habituales en los registros desde 1995. Muchos experimentos de campo y de laboratorio, algunos de ellos llevados a cabo por Blaustein y sus colaboradores, han llegado a la misma conclusión. Otros biólogos han señalado también que, en condiciones naturales, muchos anfibios pueden evitar la exposición continua a niveles de radiación como los empleados en los experimentos de la Agencia de Protección Ambiental. Los juveniles y adultos de anfibios se exponen y ocultan de la luz a voluntad; en muchas ocasiones viven en aguas turbias o siguen hábitos nocturnos.

El papel de la contaminación

Mientras unos estudiaban la relación entre la radiación ultravioleta y las malformaciones, otros analizaban la influencia de la contaminación en los medios acuáticos; por ejemplo, la debida al lavado de los plaguicidas. Se centraron en la contaminación porque muchos de los primeros casos de malformaciones procedían de áreas donde año tras año se emplean grandes cantidades de insecticidas y abonos. A mediados de los años noventa numerosos experimentos habían demostrado que una gran variedad de agentes contaminantes podía matar a los anfibios, aunque no estaba claro si inducían también la formación de extremidades supernumerarias o incompletas.

Una de las mayores dificultades para los toxicólogos es la de identificar el agente o grupo de agentes responsables. Cada año se emplean millones de toneladas de cientos de agentes contaminantes distintos en áreas donde se han registrado casos de malformaciones en anfibios. Ello no impidió que un agente químico pasara muy pronto a encabezar la lista de posibles candidatos: el metopreno. Este agente, cuyo uso comercial fue aprobado en 1975, se propuso como sustitución inocua del prohibido DDT.

La preocupación inicial acerca del posible papel del metopreno partía de su similitud con los retinoides. Estas sustancias químicas, en especial el ácido retinoico, desempeñan un papel crucial en el desarrollo de los vertebrados; su exceso o defecto puede inducir malformaciones en los embriones. (Numerosos casos de abortos o defectos de nacimiento en humanos están provocados por el consumo materno de medicamentos contra el acné que contienen derivados del ácido retinoico.)

Algunos biólogos pensaron que el metopreno podía ejercer un efecto similar sobre las ranas. En una serie de experimentos llevados a cabo a finales de los noventa, la Agencia de Protección Ambiental de Minnesota demostró que, con cantidades elevadas de ácido retinoico, se promovía la formación de extremidades posteriores incompletas en ranas.

Sin embargo, otros experimentos similares que emplearon metopreno no produjeron malformación alguna. A mayor abundamiento, otros datos obtenidos de manera indepen-

Resumen/*Malformaciones en anfibios*

- Desde mediados de los noventa han ido encontrándose extrañas malformaciones en más de 60 especies de ranas, sapos y salamandras de cuatro continentes. El porcentaje de animales que sufren malformaciones ronda el 25 % en algunas poblaciones, un porcentaje significativamente superior al que podía observarse unas décadas atrás.
- Los estudios llevados a cabo han llegado a conclusiones contradictorias que apuntan como causas la excesiva exposición a la radiación ultravioleta, la contaminación de los medios acuáticos o la epidemia de un parásito.
- Pruebas recientes señalan que el parásito es el responsable de una de las anomalías más frecuentes —la presencia de extremidades posteriores supernumerarias— y sugiere que la alteración de hábitats por el hombre agrava el problema.

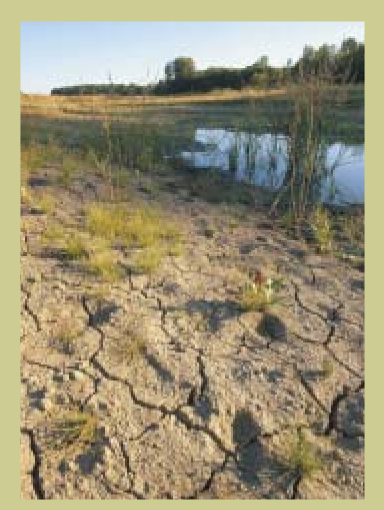
Desfigurados y en declive

¿Pueden explicar las malformaciones el reciente declive de poblaciones de anfibios?

Ranas, sapos y salamandras han ido progresivamente encaramándose a puestos cada vez más altos en la larga lista de seres en peligro de extinción desde la publicación, hace 20 años, de los primeros informes acerca de declives poblacionales. Una pregunta inmediata para los biólogos es hasta qué punto las malformaciones físicas contribuyen a estos declives.

La mayoría de los anfibios que sufren malformaciones termina por desaparecer de la población porque no pueden escapar de sus depredadores ni alimentarse de manera eficiente. Los acontecimientos que incrementan el número de animales que maduran con malformaciones —como la epidemia de parásitos que sufren decenas de enclaves de Norteamérica— podrían llevar a la extinción a una población completa, especialmente si la incidencia de las malformaciones continuase aumentando. Aunque estas extinciones podrían estar produciéndose en algunos sitios, muchas poblaciones de anfibios han sufrido serios declives sin que se hayan detectado malformaciones, lo que induce a pensar que éstas quizá no sean la única causa de los declives. Otros peligros ambientales parecen tener mayor peso.

Los anfibios ocupan ecosistemas muy diversos: desiertos, bosques y praderas, desde el nivel del mar hasta las cumbres de las montañas. Ahora bien, pese a tal riqueza de nichos que ocupan, muy pocos están protegidos frente a la no menor batería de agravios que los humanos les infligimos. Se han destruido del todo algunos hábitats importantes para los anfibios o se encuentran contaminados hasta límites que no son capaces de tolerar. En otras ocasiones, se han introducido especies alóctonas que depredan o desplazan a las poblaciones nativas de anfibios.



EL SUELO RESQUEBRAJADO señala el final de la temporada para un hábitat de anfibios en el oeste de los Estados Unidos.

Algunas de las alteraciones más extendidas pueden reducir la población o provocar malformaciones. Se ha demostrado que el exceso de radiación ultravioleta —resultado de la pérdida de ozono en las capas superiores de la atmósfera por culpa de la actividad humana— puede inhibir la formación de extremidades en juveniles de anfibios o incluso matar embriones dentro de sus vulnerables huevos sin protección. En el futuro, se prevé que el calentamiento global reseque hábitats favorables para los anfibios, mientras promueve, al propio tiempo, la aparición, en otras zonas, de infecciones que producen alteraciones en el desarrollo normal. Cuando se trata de problemas tan apremiantes como éstos, atajar los declives probablemente ayudará también a reducir el problema de las malformaciones.

diente en estudios de campo sugerían también que el plaguicida no podía ser la única causa. El metopreno se descompone rápidamente en la naturaleza. Los investigadores no hallaron pruebas de que pudiera permanecer mucho tiempo en el medio en áreas donde las malformaciones son frecuentes.

Lo mismo puede decirse de otros 61 productos químicos de uso agrícola y sus respectivos residuos, cuyos niveles fueron analizados en zonas del oeste de Estados Unidos donde habían aparecido malformaciones. Esto no descarta a los plaguicidas. Aún sigue sin analizarse el efecto de otros cientos de ellos y existen pruebas de que algunos pueden causar daños corporales (aunque no producen la formación de extremidades supernumerarias).

A partir, pues, de los resultados de los experimentos reseñados cabe deducir una conclusión provisional: los agentes contaminantes y la radiación ultravioleta son capaces de inducir malformaciones. Pero existe una amenaza más grave que parece tener un impacto mucho mayor en la naturaleza.

Parásitos prolíficos

Los primeros signos de la amenaza —aparentemente la causa de las anomalías generalizadas en las extremidades posteriores— se produjeron mucho antes de los inquietantes descubrimientos de Minnesota. A mediados de los ochenta, Stephen B. Ruth, entonces en el Colegio Universitario de Monterrey Peninsula, estudiaba charcas en el norte de California cuando descubrió centenares de ejemplares de ranitas arborícolas (*Hyla regilla*) y salamandras (*Ambystoma macrodactylum*) a las que faltaban patas o bien tenían extremidades supernumerarias u otras malformaciones. Sin embargo, no llamó la atención sobre el problema, pensando que se encontraba ante una anomalía aislada.

En 1986 Ruth le pidió a Stanley K. Sessions, ahora en la Universi-

Los autores

ANDREW R. BLAUSTEIN y PIETER T. J. JOHNSON comenzaron a estudiar conjuntamente las posibles causas de las malformaciones en anfibios en 1998. Blaustein, que obtuvo su doctorado en 1978 en la Universidad de California en Santa Bárbara, enseña zoología en la Universidad estatal de Oregón. Ecólogo especializado en procesos poblacionales y en comportamiento, ha investigado la dinámica de los declives de poblaciones de anfibios en todo el mundo, más concretamente en lo que se refiere a los efectos de la radiación ultravioleta, los agentes contaminantes, los patógenos y las especies introducidas. Johnson, doctor contratado en el centro de limnología de la Universidad de Wisconsin en Madison, estudia la influencia humana en la aparición de nuevas enfermedades en medios acuáticos.

FRANS LANTING *Minden Pictures*

ASI MUTILAN LOS PARASITOS A LAS RANAS



EL CICLO BIOLÓGICO del trematodo *Ribeiroia ondatrae* le permite inducir malformaciones —incluida la formación de extremidades posteriores supernumerarias— en sucesivas generaciones de ranas. Las primeras formas larvarias del trematodo infectan a un caracol (*1*). Después de transformarse en el interior del caracol en una segunda larva de vida libre, el parásito se introduce en los lugares donde se formarán las patas traseras de los renacuajos (*2*). Allí forman quistes que alteran el desarrollo normal de las extremidades y provocan que el renacuajo desarrolle extremidades posteriores supernumerarias cuando se transforma en una rana (*3*). Las ranas con malformaciones son presas fáciles para el hospedador definitivo del parásito, a menudo una garza (*4*). El parásito alcanza la madurez sexual y se reproduce en el interior de las aves, que devuelve los huevos del trematodo al agua a través de los excrementos (*5*). Al eclosionar (*6*), las larvas comienzan el ciclo de nuevo (*6*). La actividad humana puede fomentar este proceso, especialmente en zonas donde los abonos animales y químicos acaban en las charcas; aquí desencadenan "explosiones" de las poblaciones de algas que nutren a los caracoles y, por tanto, producen un incremento de sus poblaciones. El exceso de radiación ultravioleta y la lixiviación o lavado de los plaguicidas —que pueden causar otro tipo de malformaciones cuando actúan de manera aislada— pueden favorecer el ciclo al debilitar el sistema inmunitario de los renacuajos y hacer a los animales más vulnerables a la infección parasitaria.

DAVID FIERSTEIN

dad de Hartwick, en el estado de Nueva York, que estudiara aquellos extraños anfibios. Sessions accedió y no tardó en advertir que estaban infectados por un trematodo parásito (lo que vulgarmente se denominan gusanos planos o duelas). Los trematodos de California —de una especie desconocida en aquel momento— no parecían matar directamente a sus hospedadores. Sessions sospechaba que su presencia en un renacuajo alteraba mecánicamente su desarrollo normal en las partes del cuerpo en que el parásito se encontraba enquistado, que era sobre todo en las patas posteriores. Para comprobar la hipótesis, realizó experimentos que simulaban quistes de trematodos, implantando bolitas de vidrio en primordios de extremidades de sapos de uñas africanos (gén. *Xenopus*) y ajolotes (*Ambystoma mexicanum*). Estas dos especies, que son los modelos habituales de los estudios de biología de anfibios por la facilidad con que se crían en cautividad, desarrollaban extremidades supernumerarias y otras malformaciones de manera muy similar a como lo harían si estuvieran realmente parasitadas.

Pese a tan interesantes resultados, no consiguieron demostrar que los trematodos fueran los responsables de las malformaciones en los ejemplares colectados por Ruth: no se conocen casos de malformaciones en sapos de uñas africanos o ajolotes en condiciones naturales. La investigación que terminaría por sentenciar la conexión entre trematodos y extremidades supernumerarias o ausencia de extremidades se produjo tras la conmoción generada en

1995. En aquel momento, Johnson buscaba en la bibliografía especializada pistas para identificar las causas y se encontró con los descubrimientos de Ruth y Sessions. Johnson y su grupo iniciaron entonces muestreos más amplios en humedales de California entre 1996 y 1998. Descubrieron que en las charcas donde se encontraban ranitas arborícolas con extremidades aberrantes también era abundante el caracol acuático *Planorbella tenuis*, uno de los hospedadores intermedios del trematodo identificado por Sessions, ahora conocido como *Ribeiroia ondatrae*.

Pensando que podrían haber identificado una correlación directa entre la presencia de un parásito y las malformaciones en anfibios en condiciones naturales, Johnson y su equipo comenzaron a colectar ejemplares de ranas con malformaciones y a diseccionarlas. En todos los casos encontraron quistes del parásito formando densas agrupaciones inmediatamente debajo de la piel que rodea la base de las patas traseras. Para comprobar que los parásitos desencadenaban el desarrollo de extremidades posteriores supernumerarias, expusieron a los renacuajos de las ranitas arborícolas al parásito en condiciones de laboratorio. De acuerdo con lo esperado, las ranitas infectadas desarrollaban malformaciones idénticas a las observadas en la naturaleza, incluidas la ausencia de extremidades y la presencia de extremidades supernumerarias. Los niveles más altos de infección producían más malformaciones, mientras que las ranitas no infectadas se desarrollaban con normalidad.

Con esa investigación se dio un paso decisivo para la resolución del misterio de las malformaciones en anfibios. Los experimentos ulteriores, incluido el que realizamos en 2001 con el sapo occidental (*Bufo boreas*), pusieron de manifiesto la intervención de *Ribeiroia* en la generación de malformaciones en otras especies de anfibios, no sólo en las ranitas arborícolas. Dos estudios publicados el pasado verano y llevados a cabo por Joseph Kiesecker, de la Universidad de Pennsylvania, junto con un equipo formado por Sessions y Geffrey Stopper y sus





STEVEN HOLT *Stockpix.com*

2. LAS MALFORMACIONES DIFIEREN en sus causas más probables. Los trematodos parásitos pueden desencadenar el crecimiento de extremidades posteriores supernumerarias (*izquierda*). También pueden producir extremidades posteriores escasamente desarrolladas, si no inhibir del todo su aparición. En ese efecto podrían intervenir, asimismo, el exceso de radiación ultravioleta, la acción de agentes químicos contaminantes o las heridas causadas por los depredadores. La radiación ultravioleta probablemente causa más a menudo anomalías en los ojos (*derecha*) y en la piel.

colaboradores en la Universidad de Yale, demostraron que *Ribeiroia* podía provocar malformaciones en las extremidades posteriores de otras especies de ranas (*Rana sylvatica* y *Rana pipiens*).

De acuerdo con otras pruebas, *Ribeiroia* siempre se encuentra en los mismos lugares donde hay anfibios con malformaciones. En cambio, los contaminantes químicos aparecen asociados a estos lugares con una frecuencia mucho menor. Por si fuera poco, el efecto de la infección parasitaria parece haberse disparado en los últimos años, hasta alcanzar proporciones de epidemia quizás. En el rastreo exhaustivo que hicimos de la bibliografía, a comienzos del año 2001, sólo aparecieron siete registros de poblaciones de anfibios con malformaciones e infecciones por *Ribeiroia* anteriores a 1990.

Compárese con el trabajo de campo publicado por nosotros el año pasado: contamos hasta 25 hábitats con esas características sólo en el oeste de Estados Unidos. En estos lugares, seis especies de anfibios presentaban malformaciones; la proporción de individuos afectados en cada población oscilaba entre el 5 % y el 90 %. En los últimos dos años otros investigadores han hallado casos de malformaciones producidas por *Ribeiroia* en los estados de Wisconsin, Illinois, Pennsylvania, Nueva York y Minnesota, incluida la charca donde aquellos ocho estudiantes saltaron a la fama.

Aunque el incremento en el número de casos descritos podría deberse en parte a un muestreo más extenso, la mayoría de las ranas con malformaciones fue encontrada por personas (en muchos casos niños) sin interés directo en el estudio de las malformaciones.

Trabajo en equipo

Conocemos ya la participación del ciclo biológico de *Ribeiroia* en la persistencia del fenómeno de la malformación a lo largo de generaciones de los anfibios que comparten hábitat con los caracoles infectados. Después de abandonar al caracol, y tras encontrar un renacuajo, el parásito se enquista cerca de las patas traseras del mismo. Los renacuajos infectados desarrollan entonces patas supernumerarias o bien son incapaces de desarrollar las dos extremidades posteriores. En cualquier caso, los anfibios recién metamorfoseados no pueden mo-

verse con normalidad; constituyen así presas fáciles para los hospedadores definitivos del parásito, normalmente garzas. Los parásitos alcanzan la madurez sexual dentro de las aves, a través de cuyos excrementos los huevos del tremátodo llegan al agua. Cuando las larvas eclosionan, encuentran un caracol y el ciclo comienza de nuevo.

Sabemos que la epidemia, creciente, de *Ribeiroia* puede ser responsable de una parte, o de la mayor parte, del aumento en el número de malformaciones en anfibios a lo largo de los últimos años. Pero, ¿a qué se debe esa epidemia? Desde una óptica ecológica se apunta a la alteración de los hábitats naturales por el hombre. Lo mismo en las poblaciones humanas que en las animales las enfermedades infecciosas surgen o se hacen más frecuentes a medida que el medio cambia en el sentido más favorable para la proliferación del patógeno. En ese orden, la reforestación del noreste de Estados Unidos ha posibilitado la aparición de la enfermedad de Lyme, al favorecer la proliferación de ciervos que hospedan a los ácaros portadores de la bacteria de Lyme. La creación de presas en algunos ríos africanos ha permitido que se extiendan duelas que dependen de caracoles como hospedadores intermedios y cuya presencia en la sangre de los humanos causa la esquistosomiasis. Durante los últimos decenios, la alteración de hábitats naturales también ha favorecido la expansión de los hantavirus, el Ebola, el virus del Nilo Occidental, el dengue y el sida.

Nosotros hemos demostrado la relación directa entre la alteración del hábitat por parte del hombre y los sitios donde *Ribeiroia* abunda sobremanera. En muestreos que llevamos a cabo en el oeste de Estados Unidos y que publicamos en 2002, descubrimos que 44 de los 59 lugares donde los anfibios se hallaban infectados por *Ribeiroia* eran albercas, abrevaderos u otro tipo de estanques creados por el hombre. El lavado de los abonos y el estiércol producen en muchas ocasiones "explosiones" de poblaciones de algas en estos hábitats, lo que significa alimento abundante para los caracoles hospedadores de *Ribeiroia*. Poblaciones mayores de caracoles equivale a decir más ranas con malformaciones. Los otros hospedadores necesarios, las aves zancudas, abundan en este tipo de medios humanizados.

Aunque la infección por tremátodos es la causa más factible para explicar la mayoría de los casos de malformaciones en anfibios, no constituye la única. Además, podría verse reforzada a menudo por otros factores adicionales. En ocasiones, los agentes químicos que contaminan las aguas o el exceso de radiación ultravioleta pueden actuar de manera independiente causando determinados problemas (deformidades en el cuerpo o anomalías en piel y ojos). En otras ocasiones, los contaminantes o la radiación pueden favorecer la infección debilitando el sistema inmunitario de los anfibios y haciéndolos más vulnerables a una infección por parásitos. En otro posible escenario más, un aumento en las poblaciones de depredadores de anfibios como peces, sanguijuelas o galápagos podría causar más malformaciones al rebanarles las extremidades de los renacuajos.

Los anfibios se hallan sujetos a una mezcla de agentes que producen estrés en los individuos y luego, probablemente, afectan a toda la población. Importa determinar la repercusión específica de cada agente para comprender luego sus interacciones con los demás factores. Los humanos y otros animales pueden verse afectados por las mismas amenazas ambientales que sufren los anfibios. Deberíamos escuchar su aviso.

Bibliografía complementaria

THE EFFECT OF TREMATODE INFECTION ON AMPHIBIAN LIMB DEVELOPMENT AND SURVIVORSHIP. Pieter T. J. Johnson, Kevin B. Lunde, Euan G. Ritchie y Alan E. Launer en *Science*, vol. 284, págs. 802-804; 30 de abril, 1999.

A PLAGUE OF FROGS. William Souder. Hyperion Press, 2000.

ECOSYSTEMS, EVOLUTION AND UV RADIATION. Dirigido por Charles S. Cockell y Andrew R. Blaustein. Springer-Verlag, 2001.

La bebida, ¿beneficiosa para la salud?

Tres décadas de investigación han demostrado que beber pequeñas o moderadas cantidades de alcohol tiene efectos beneficiosos sobre el sistema cardiovascular. El dilema de los médicos está en si recomendarlo a determinado tipo de pacientes

Arthur L. Klatsky

El discurso que Abraham Lincoln dirigió en 1842 a una sociedad por la abstinencia de Illinois incluyó una frase sobre los "licores embriagadores" que no debió de tener muy buena acogida. "Es cierto que... a muchos les hizo un gran daño", señaló el futuro presidente. "Pero ninguno de ellos pareció pensar que el daño provenía del uso de algo malo, sino del abuso de una cosa muy buena."

La sociedad occidental siempre ha tenido problemas para decidir si el alcohol era beneficioso o perjudicial. En EE.UU., millones de personas son hoy objeto de una verdadera avalancha de anuncios de bebidas alcohólicas que alientan a la gente a beber, con el recuerdo de una Ley Seca que las ilegalizó en el siglo XX. A pesar de la popularidad del alcohol en la actualidad, muchos consideran sin embargo la abstinencia una virtud. Ciertamente, el alcoholismo depara gran preocupación por las terribles consecuencias que tiene sobre las personas que abusan del alcohol y sobre la sociedad en general. Pero la preocupación por los peligros derivados del abuso del alcohol con frecuencia lleva a la negación emocional de que el alcohol pueda tener alguna cualidad beneficiosa para la salud. Esta actitud negativa ignora la evidencia creciente de que la ingesta moderada de alcohol previene determinadas dolencias cardiovasculares, sobre todo infartos y embolias (causadas por la obstrucción de los vasos sanguíneos). Algunos estudios demuestran incluso su acción protectora contra la demencia, en no pocos casos secundaria a enfermedades cardiovasculares.

El efecto del alcohol

Un debate sobre la moderación en la bebida requiere una definición de lo que se considera "moderado". Las simples definiciones de poco, moderado o excesivo resultan arbitrarias, pero el consenso científico sitúa el límite máximo para lo que se considera ingesta de alcohol moderada en dos medidas estándar de alcohol al día (*véase el recuadro* "Medidas 'estándar' de alcohol"). Los estudios demuestran que sobrepasar estos límites puede resultar dañino para la salud, aunque el sexo, la edad y otros factores sean determinantes en el aumento y disminución de los límites que cada individuo debería observar.

El principal beneficio sobre la salud del uso razonable del alcohol parece ser una disminución en el riesgo de padecer cardiopatía isquémica, secundaria al desarrollo de aterosclerosis (formación de placas de grasa) en las arterias que llevan la sangre al corazón. (La palabra "aterosclerosis" resulta de la yuxtaposición de dos palabras griegas: *athera*, que significa

“pulpa” o “papilla”, se refiere al depósito de grasa, y *sclera*, que significa “duro”, remite a la pérdida de elasticidad de los vasos sanguíneos).

La aterosclerosis obstaculiza el flujo sanguíneo y favorece la formación de coágulos que pueden llegar a obstruir los vasos. Es entonces cuando puede aparecer angina de pecho (molestias en el pecho resultado de los bajos niveles de oxigenación del miocardio, el tejido muscular del corazón), infarto (necrosis o destrucción del miocardio, que ocurre cuando un coágulo o la constricción de las arterias impiden que la sangre llegue al corazón) e incluso la muerte, a menudo súbita. La dolencia suele aparecer a una edad temprana, pero tarda décadas en convertirse en cardiopatía isquémica sintomática. La cardiopatía isquémica es la enfermedad del corazón más frecuente en los países desarrollados y es causa del 60 por ciento de las muertes por enfermedades cardiovasculares y de alrededor del 25 por ciento de todas las muertes en estos países.

Los anatomopatólogos descubrieron las primeras claves de las cualidades del alcohol a principios del siglo pasado, cuando observaron que la mayor parte de las arterias de los fallecidos por cirrosis hepática alcohólica estaban extraordinariamente “limpias”, sin asomo de aterosclerosis. Una de las hipótesis explicativas sostenía que el alcohol actuaba como disolvente inespecífico de los depósitos de las arterias. Otra interpretación postulaba que los alcohólicos morían antes de que la aterosclerosis tuviera oportunidad de desarrollarse. Sin embargo, ninguno de estos argumentos ofrecía una explicación satisfactoria al respecto.

Un dato revelador apareció a finales de los años sesenta, gracias a Gary D. Friedman, del Centro Médico Kaiser Permanente de Oakland, California. Friedman se propuso utilizar ordenadores para descubrir nuevos predictores de infartos. En primer lugar, el poder de la computación permitiría la identificación de personas sanas con factores de riesgo similares a los de las víctimas de infartos, entre los que se cuentan el



tabaco, la hipertensión arterial, la diabetes, los niveles elevados de colesterol LDL y los bajos de colesterol HDL (colesterol "malo" y "bueno", respectivamente, tal como se conocen en el lenguaje común), el sexo masculino y los antecedentes de enfermedades coronarias entre los familiares. Friedman buscó entonces factores que pudieran predecir los infartos comparando a los pacientes en cientos de formas. Por ejemplo, sus hábitos deportivos y dietéticos, y sus respectivos niveles de diversos componentes en la sangre. El ordenador aportó un descubrimiento sorprendente: la abstinencia de alcohol estaba asociada al aumento en el riesgo de sufrir un infarto.

Muchos estudios habían omitido la relación, porque no habían tenido en cuenta el uso del alcohol como un comportamiento separado de la conducta del fumador. Ahora sabemos la razón: porque los bebedores suelen ser, además, fumadores, el efecto negativo del tabaco impedía percibir el beneficioso del alcohol. En 1974, junto con mis colaboradores del Kaiser Permanente, Friedman y Abraham B. Siegelaub, publicamos el primer estudio hasta entonces realizado sobre los efectos del consumo moderado de alcohol en personas no fumadoras. Descubrimos una clara relación entre el consumo de alcohol y la disminución en el riesgo de sufrir un infarto.

Desde esa fecha, muchas de las investigaciones en torno a hombres y mujeres de diversas razas y países han estudiado la relación entre su actual estado de salud y el consumo previo de alcohol. Estos estudios han arrojado firmes conclusiones que demuestran que los individuos que no beben alcohol desarrollan con más frecuencia cardiopatía isquémica, en sus formas fatales y no fatales, que los que consumen alcohol con moderación. Además, en el año 2000 Giovanni Corrao, de la Universidad italiana de Milan-Bicocca, Kari Poikolainen, del Hospital para Adicciones Järvenpää de Finlandia, con sus respectivos colaboradores, contrastaron los resultados de 28 investigaciones ya publicadas sobre la relación entre el consumo de hasta 25 gramos diarios de alcohol y la cardiopatía isquémica. El riesgo de desarrollar la enfermedad era inversamente proporcional al consumo de alcohol. Veinticinco gramos de alcohol, el equivalente a dos unidades estándar de bebida, reducía un 20 por ciento el riesgo de un ataque al corazón, fatal o no.

Los nuevos datos relativos a la acción preventiva del alcohol frente a la muerte por cardiopatía isquémica son aún más sorprendentes. El pasado noviembre, durante una convención de la Asociación Americana del Corazón, Friedman, Mary Anne Armstrong y Harald Kipp y el autor examinaron un análisis actualizado realizado sobre 128.934 pacientes que habían pasado revisiones médicas entre 1978 y 1985, de los cuales 16.539 fallecieron entre 1978 y 1998, 3001 a consecuencia de enfermedades coronarias. Descubrimos que el riesgo de muerte por enfermedades coronarias de aquellos que bebían una o dos copas al día era un 32 por ciento inferior al de los abstemios.

Los mecanismos por los que el alcohol tiene efectos tan sorprendentes sobre el sistema cardiovascular están íntimamente relacionados con los niveles de colesterol y con la coagulación sanguínea. Las grasas de la sangre, los lípidos, desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de la cardiopatía isquémica. Múltiples estudios han demostrado que el consumo moderado de alcohol aumenta de un 10 a un 20 por ciento los niveles de colesterol HDL, su fracción beneficiosa para el corazón. Precisamente, las personas con un elevado nivel de HDL, que aumenta con el ejercicio físico y con determinados fármacos, tienen menos riesgo de padecer cardiopatía isquémica.

La reducción del riesgo resulta de la capacidad del colesterol HDL para reconducir el colesterol LDL al hígado para su reciclaje o eliminación, entre otros efectos. De esta manera se reduce la acumulación de colesterol en las paredes de los vasos sanguíneos y, en consecuencia, se obstaculiza la formación de las placas ateroscleróticas. El alcohol parece influir especialmente

El autor

ARTHUR L. KLATSKY es médico especialista en cardiología e investigador adjunto en la división de investigación del Centro Médico Kaiser-Permanente de Oakland, California. Graduado en la Escuela de Medicina de Harvard, fue jefe del departamento de cardiología del Centro Médico Kaiser-Permanente de 1978 a 1994 y dirigió su unidad de cuidados coronarios de 1968 a 1990. Desde 1977 ha sido el investigador principal de una serie de estudios sobre la relación entre el consumo de bebidas alcohólicas y la salud. El artículo publicado en 1974 en el *Annals of Internal Medicine* (*véase la Bibliografía Complementaria*) fue el primer informe epidemiológico acerca de la relación inversa entre el consumo de alcohol y las enfermedades coronarias. Dicho artículo fue citado en 1995 por el Instituto Nacional de Abuso del Alcohol y Alcoholismo como uno de los 16 artículos fundamentales en la investigación sobre el alcohol. Su mayor logro reciente ha sido su ingreso como miembro del Foro de Salud Cardiovascular de 2000-2001. Klatsky ha corrido seis maratones y en 1990 encumbró el Kilimanjaro.

Resumen/*El alcohol y la salud del corazón*

- Una gavilla de estudios realizados en todo el mundo señalan que el consumo de alcohol en cantidades bajas a moderadas reduce en casi un tercio el riesgo de fallecer por cardiopatía isquémica.
- Algunos estudios apuntan al vino tinto como un protector particularmente eficaz contra la cardiopatía isquémica. Sin embargo, puede que otros hábitos saludables usuales en consumidores de vino tinto sean los verdaderos responsables de los efectos beneficiosos.
- Una determinada parte de la población con cardiopatía isquémica o con riesgo de padecerla, aunque no de adicción, podría querer consultar con su médico acerca de la posibilidad de incluir el alcohol en su dieta en beneficio del corazón.

sobre la subespecie HDL3, con efecto protector sobre el corazón, más que sobre el colesterol HDL2, que aumenta con el ejercicio físico. No se conocen con detalle las vías metabólicas del hígado por las que el alcohol incrementa los niveles de HDL. Se sospecha su modulación de ciertas enzimas hepáticas. Tres estudios distintos dirigidos a determinar las aportaciones específicas del alcohol desembocan en un mismo resultado común: se presume que gracias a los elevados niveles de colesterol HDL en bebedores, el riesgo de padecer cardiopatía isquémica disminuye en aproximadamente la mitad de los casos.

Los coágulos pueden provocar infartos si se llegan a formar en las zonas de las arterias coronarias afectadas por aterosclerosis. Es probable que el alcohol interrumpa la compleja cascada bioquímica que provoca la coagulación de la sangre. Los trombocitos, componentes celulares de los coágulos, pueden perder parte de sus propiedades viscosas cuando hay alcohol por medio, lo cual disminuye su participación en la coagulación, a pesar de que existen datos ambiguos al respecto. Un estudio realizado en 1984 por Raffaele Landolfi y Manfred Steiner, del Hospital Memorial de la Universidad de Brown, reveló que el consumo de alcohol incrementaba los niveles de prostaciclina, sustancia que interfiere en la coagulación de la sangre, en relación con los niveles de tromboxacina, que activa la coagulación. Walter E. Laug, de la facultad Keck de medicina de la Universidad del Sur de California, demostró que el alcohol aumenta los niveles de la fibrinolisina, una enzima que disuelve los coágulos. Múltiples estudios sugieren, por último, que el alcohol disminuye los niveles del fibrinógeno, un generador de coágulos.

En general, las propiedades anticoagulantes del alcohol no están tan claramente definidas como lo están sus efectos sobre el colesterol HDL e incluso algunos de sus efectos podrían resultar contraproducentes si se consume alcohol de forma acusada, como la formación de trombocitos. Lo cierto es que los consumidores moderados de alcohol se benefician de sus efectos anticoagulantes, que parecen desempeñar una función importante en la disminución del riesgo de sufrir un infarto. Es más, hay estudios que demuestran que incluso las personas que toman menos de dos copas al día, pongamos por caso tres o cuatro copas a la semana, también se benefician de los efectos reductores del riesgo de padecer cardiopatía isquémica. El alcohol en cantidades pequeñas deviene un factor protector de gran importancia en cuanto es un notable anticoagulante. Sin embargo, dichas cantidades de alcohol parecen ser insuficientes para actuar de forma significativa sobre los niveles del colesterol HDL.

Existen otras vías más sutiles, distintas de su capacidad de aumentar el HDL y de la de disminuir la coagulación de la sangre, por las que el alcohol podría reducir los riesgos de padecer cardiopatía isquémica. El consumo moderado de alcohol también disminuye el riesgo de afectación por diabetes mellitus tipo 2 (mayor prevalencia en adultos), que es una poderosa predictora de la cardiopatía isquémica, lo cual permite reducir de forma indirecta los riesgos de padecerla. Estos efectos fa-

MEDIDAS "ESTANDAR" DE ALCOHOL

UN VASO DE VINO TINTO, que contiene diez gramos de alcohol, constituye un buen patrón para normalizar las bebidas. Así, por ser equivalentes las cantidades de alcohol, 25 centilitros de cerveza o un vaso de tres centilitros de alcohol destilado (vodka o whisky) resultan bebidas de cuantía estándar.

TINA WEST

¿BEBER O NO BEBER? ESA ES LA CUESTION

Roger R. Ecker, cirujano cardiovascular del Centro Médico Summit de Oakland, California, y el autor desarrollaron este diagrama para ayudar a las personas a considerar la inclusión del alcohol en sus dietas y, en tal caso, su cantidad. Estos diagramas están diseñados para ser utilizados por los médicos durante la consulta con sus pacientes. Los factores de riesgo de padecer cardiopatía isquémica aparecen relacionados al pie. "Bajo/Moderado" está definido como el consumo de una bebida estándar al día para las mujeres y de hasta dos al día para los hombres. "Excesivo" responde a tres o más bebidas al día en los hombres y dos o más bebidas al día en mujeres.

Esta tabla no debe aplicarse a los siguientes individuos, que deberían abstenerse de tomar alcohol: los menores de 21 años; las mujeres embarazadas; los abstemios con antecedentes familiares de alcoholismo o con un historial de abuso de alcohol, con órganos dañados por el alcohol, con cualquier enfermedad hepática crónica, con riesgo genético de padecer cáncer de pecho o de ovario o con creencias morales o religiosas que prohíben el consumo de alcohol.

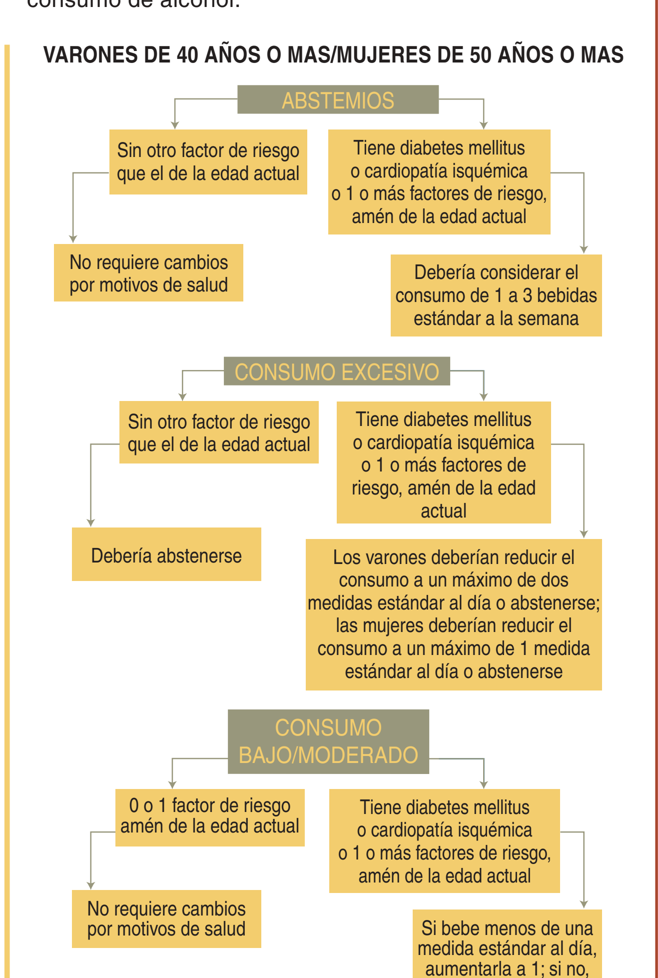
VARONES DE 21 A 39 AÑOS/MUJERES DE 21 A 49 AÑOS

ABSTEMIOS
0 o 1 factor de riesgo de padecer cardiopatía isquémica → No requiere cambios por motivos de salud
Tiene diabetes mellitus o cardiopatía isquémica o tiene 2 o más factores de riesgo de padecerla → Debería considerar el consumo de 1 a 3 bebidas estándar a la semana

CONSUMO EXCESIVO
0 o 1 factor de riesgo de padecer cardiopatía isquémica → Debería abstenerse
Tiene diabetes mellitus o cardiopatía isquémica o tiene 2 o más factores de riesgo de padecerla → Debería reducir su consumo a un máximo de una medida estándar o abstenerse

CONSUMO BAJO/MODERADO
0 o 1 factor de riesgo de padecer cardiopatía isquémica → No requiere cambios por motivos de salud
Tiene diabetes mellitus o cardiopatía isquémica o tiene 2 o más factores de riesgo de padecerla → No requiere cambios por motivos de salud

VARONES DE 40 AÑOS O MAS/MUJERES DE 50 AÑOS O MAS



Factores de riesgo para la cardiopatía isquémica, según las directrices del Programa Nacional de Educación sobre el Colesterol:

1. Antecedentes familiares con cardiopatía isquémica (padre o hermano menor de 55 años con cardiopatía isquémica, madre o hermana menores de 65 años con cardiopatía isquémica)
2. Tabaquismo
3. Hipertensión arterial
4. Colesterol total superior a 200.
5. Colesterol HDL inferior a 35 (si el HDL es superior a 60, sustraer un factor de riesgo)
6. Ser varón de 40 años o más, y ser mujer de 50 años o más

vorables se basan en una intensificación de la sensibilidad a la insulina, que fomenta el empleo correcto de glucosa. (Un consumo de alcohol elevado se relaciona, sin embargo, con el incremento de los niveles de glucosa en la sangre, indicativo de una futura diabetes.) Aumentan los datos que apuntan que la inflamación también favorece la cardiopatía isquémica. Precisamente, otro de los factores que explican los efectos beneficiosos del alcohol sobre la cardiopatía isquémica es su efecto antiinflamatorio, especialmente cuando actúa sobre el tejido endotelial que tapiza el interior de los vasos sanguíneos.

Antes de admitir que el alcohol tiene efectos beneficiosos, cualquier epidemiólogo intentaría detectar fac-

tores ocultos. ¿Es posible atribuir el alto riesgo de padecer cardiopatía isquémica de los abstemios a sus rasgos psicológicos, sus hábitos alimentarios, la práctica de ejercicio físico o a otros factores sin necesidad de invocar la ausencia de alcohol en su dieta para explicarlo? Si estas características sirvieran para descartar el aparente efecto preventivo del alcohol, se requeriría su contemplación en ambos sexos, en todos los países y en varias etnias. Teniendo en cuenta que no se han podido identificar dichas características, la explicación más simple y plausible estriba en afirmar que el consumo ligero o moderado de alcohol aumenta la salud cardiovascular.

De hecho, los datos obtenidos cumplen con los criterios epidemiológicos comunes que permiten establecer una relación de causalidad. Los innumerables estudios que analizan el consumo ligero y moderado de alcohol y sus efectos sobre la salud, logran conclusiones firmes. Los estudios se realizaron respetando una secuencia temporal correcta, es decir, se identificaron los hábitos de interés en individuos y posteriormente se realizó un seguimiento de su salud durante un largo período de tiempo. Efectivamente, los consumidores de alcohol presentan un perfil de salud distinto del ofrecido por los abstemios. Los beneficios asociados al alcohol pueden atribuirse a mecanismos biológicos plausibles. El alcohol aporta beneficios de forma específica sobre la salud cardiovascular, pero no protección general frente a cualquier enfermedad. Los efectos del alcohol se pueden identificar con independencia de otros factores "perturbadores" relacionados con el alcohol y que podrían ser responsables del estado cardiovascular de un individuo.

Aunque pueda sorprender a más de uno, la reducción del riesgo en un 30 por ciento resulta un dato menos convincente que los argumentos arriba mencionados, porque no hay que descartar la existencia de un factor perturbador totalmente desconocido que explique la relación de causalidad. A modo de ejemplo extremo, imaginemos un conjunto hipotético de genes que confieren a su poseedor un 60 por ciento menos de riesgo de padecer cardiopatía isquémica y que, además, provoca una fuerte predisposición por el consumo de cantidades moderadas de alcohol. Las consecuencias independientes de los genes podrían parecer ligadas por una relación causa-efecto. (Lo cierto es que no se conoce ningún factor perturbador o similar, de manera que la disminución del riesgo en un 30 por ciento aparece como probable circunstancia sobre los efectos beneficiosos del alcohol.)

El consumo de grandes cantidades de alcohol no resulta más protector que la ingesta de pequeñas dosis. La ausencia de una clara relación entre la dosis de alcohol que se ingiere y la respuesta protectora sobre el organismo, denota la fragilidad del estudio. Sin embargo, los datos recogidos sustentan que la ingesta controlada de alcohol es beneficiosa para el corazón. Debería apuntarse, sin embargo, que el tipo de estudio considerado óptimo en la investigación del ser humano (el ensayo clínico aleatorizado a ciegas) todavía no se ha llevado a cabo. Un estudio de este tipo debería reunir a un gran grupo de abstemios, la mitad de los cuales, escogidos de forma aleatoria sin conocimiento de los investigadores, empezarían un régimen moderado de alcohol, mientras que la otra mitad continuaría abstemia. Habría que hacer un seguimiento de ambos grupos durante años para observar eventuales diferencias en enfermedades cardiovasculares y en los fallecimientos a causa del corazón.

Beber o no beber

La mayoría de las personas bebe por razones que no son las de sus efectos beneficiosos sobre la salud; muchas de ellas ya han alcan-

COMO NOS PROTEGE EL ALCOHOL DE LA CARDIOPATIA ISQUEMICA

Efecto del alcohol	*Acción probable*	*Pruebas concluyentes*
Aumenta el colesterol HDL en la sangre	Elimina y transporta el colesterol LDL de las paredes de los vasos sanguíneos	Datos sólidos que lo sustentan; los efectos explican, al menos, la mitad de los beneficios del alcohol
Reduce el colesterol LDL en la sangre	Reduce los niveles de un factor de riesgo mayor de padecer cardiopatía isquémica	Resultados flojos; el efecto no debe ser independiente de la dieta
Reduce la oxidación del colesterol LDL	Previene la formación de las placas asociada a la oxidación del LDL	Muy hipotéticos, aunque el vino tinto tiene muchos antioxidantes
Reduce los niveles de fibrinógeno	Disminuye el riesgo de la formación de coágulos en las placas ateroscleróticas	Algunos datos a favor
Ejerce otras acciones anticoagulantes: disminuye la viscosidad de las plaquetas; aumenta los niveles de prostaciclina; reduce los niveles de tromboxano	Disminuye el riesgo de la formación de coágulos en las placas ateroscleróticas	Datos inconsistentes; posible inversión del efecto con consumo excesivo de alcohol
Disminuye la resistencia de la insulina	Disminuye el factor de riesgo clave en la diabetes mellitus tipo 2, propia de adultos, y en la aterosclerosis	Los hechos indicativos se han obtenido de un número reducido de estudios
Disminuye el estrés psicosocial	Poco claro	No existen datos o mecanismos similares que lo sustenten
Mejora la condición del miocardio	Aporta mejor resistencia a las zonas dañadas por falta de oxigenación	Datos preliminares lo sustentan

VINO, CERVEZA O DESTILADOS

Sea vino, cerveza o licor, todos parecen contribuir a reducir el riesgo de padecer cardiopatía isquémica. Sin embargo, se plantea la inquietante pregunta de si un tipo de bebida (por ejemplo, el vino) es mejor que las demás. La respuesta está por resolver.

La tasa de mortalidad por cardiopatía isquémica en Francia, donde es habitual beber vino tinto, es sólo de la mitad que en los Estados Unidos, a pesar de las similitudes en el estilo de vida sedentaria y en la ingesta de grasas. "La paradoja francesa" fue el lema resultante de esta observación, así como la idea de que el vino tinto es la bebida alcohólica por excelencia. Esta creencia se sustenta sobre una base hipotética según la cual el vino tinto contiene determinados ingredientes con potentes efectos antioxidantes que combaten la aterosclerosis.

Un excelente estudio realizado en Dinamarca en 1995, en el que se hizo un seguimiento a casi 13.000 personas durante 12 años, apuntaba que el índice de mortalidad por cardiopatía isquémica entre los consumidores de vino tinto era menor que entre los consumidores de otros tipos de bebidas alcohólicas. Junto con mis colaboradores del Kaiser-Permanente, Mary Anne Armstrong y Gary D. Friedman, publicamos sendos artículos sobre el riesgo de morir por cardiopatía isquémica (en 1990) y sobre el riesgo de hospitalización por cardiopatía isquémica (en 1997). Estos estudios, realizados sobre unos 130.000 californianos, demostraron que los consumidores de vino tinto y de cerveza tenían menos riesgo de padecer cardiopatía isquémica que los consumidores de bebidas alcohólicas destiladas.

En noviembre de 2002, durante la convención de la Asociación Americana del Corazón, presenté nuevos datos que actualizaban los obtenidos en el estudio realizado en 1990. Nos sorprendió descubrir que aquellos que bebían vino a diario tenían un riesgo menor, en un 25 por ciento, de padecer cardiopatía isquémica que los que bebían cerveza, aun ingiriendo la misma cantidad de alcohol. Este porcentaje ascendía a un 35 por ciento si se les comparaba con los consumidores de bebidas destiladas. Aparentemente no existían diferencias entre los beneficios que aportaba el vino tinto del blanco.

La gran complicación que presentan estos estudios está en que los hábitos generales de los consumidores de vino, de cerveza y de destilados distan mucho entre sí. En Dinamarca, por ejemplo, el consumo de vino está ligado a una dieta saludable (rica en frutas, verduras, pescado, ensaladas y aceite de oliva), así como a otros dos indicadores de buena salud en general: un estatus socioeconómico y un coeficiente de inteligencia más altos. En nuestra investigación realizada en California, también los que preferían beber vino, fumaban menos, tenían más educación y unos hábitos de consumo de alcohol más moderados que aquellos que se decantaban por la cerveza o los destilados.

Los diferentes estilos de vida entre los que prefieren un tipo de bebida alcohólica hacen que sea extremadamente difícil determinar si los efectos beneficiosos sobre la salud deben atribuirse a la bebida en sí (y por lo tanto a los componentes del vino, aparte del alcohol), al modo de consumirlas (despacio y acompañado de comida, en el caso del vino) o a otros factores.

TINA WEST

zado los niveles que aparentemente promueven la salud cardiovascular. Pero el cúmulo de resultados relativos a los aspectos positivos del alcohol supone un reto para los médicos. Por una parte parece que el consumo de alcohol en cantidades reducidas a moderadas es mejor para la salud del corazón que la abstinencia para determinadas personas. Por otra parte es evidente que el consumo abusivo de alcohol es peligroso. Puede conllevar cirrosis hepática, pancreatitis, determinados cánceres y alteraciones neurológicas degenerativas, aparte de desempeñar una importante función en multitud de accidentes, homicidios y suicidios, así como en el síndrome del feto alcohólico. (No hay datos concluyentes que vinculen el consumo moderado a ninguno de estos problemas.)

El consumo abusivo del alcohol sí conlleva alteraciones cardiovasculares. El exceso de alcohol incrementa el riesgo de sufrir cardiomiopatía alcohólica cuando el miocardio deviene demasiado débil como para bombear la sangre de forma efectiva. También conlleva hipertensión arterial (un factor de riesgo en sí mismo para la cardiopatía isquémica, el ictus o embolia, la insuficiencia cardíaca y la insuficiencia renal); y derrame cerebral, en que los vasos sanguíneos se rompen en la superficie del cerebro. El consumo despreocupado de alcohol también se asocia al "síndrome de las vacaciones del corazón", una perturbación eléctrica que interrumpe el ritmo del corazón. El nombre alude a la elevada frecuencia con que se da en los períodos vacacionales, durante los cuales las personas suelen incrementar el consumo de alcohol.

Dados los peligros potenciales del alcohol, se plantea un dilema para las personas y sus médicos. ¿Qué criterios deben valorar para decidir la inclusión o no de alcohol en sus dietas? Y, en caso de incluirlo, ¿en qué cantidades? Ayudaría poder predecir de forma meticulosa los riesgos en que incurre un individuo con la bebida. La última discusión relativa al consumo moderado de alcohol es el problema del alcoholismo. El riesgo individual se puede delimitar a través de los antecedentes personales y familiares relacionados con el alcohol, como por ejemplo, enfermedades hepáticas o, por supuesto, el alcoholismo. Incluso a pesar de haber considerado factores conocidos, pueden suceder acontecimientos impredecibles en la vida que aboquen a la bebida.

La sanidad pública se preocupa por las consecuencias del alcohol, pero sólo recientemente se han centrado con buen criterio en los efectos sociales y médicos que acarrea su consumo abusivo. Los problemas sociológicos que provoca el consumo abusivo de alcohol han sido utilizados para justificar un llamamiento a favor de la abstinencia. Sin embargo, en la actualidad se necesita un mensaje más complejo. No es apropiado recomendar la mera abstinencia a aquellas personas que consumen poco alcohol, pero que presentan un riesgo alto de padecer cardiopatía isquémica y, en cambio, un riesgo bajo de verse afectados por el alcoholismo. Gran parte de la población se integra en este grupo. Los tratamientos más recomendables para este grupo indican una dieta adecuada, dirigida a corregir el sobrepeso, la instauración de ejercicio físico, el control de la diabetes mellitus, de la hipertensión arterial y del colesterol, así como evitar el tabaco. En esta lista de actividades beneficiosas hay cabida para los que beben poco. La mayoría de los consumidores de alcohol en cantidades bajas a moderadas ya ingieren la cantidad óptima de alcohol que beneficia el sistema cardiovascular, por lo que deberían continuar en esta tónica.

Jamás deberá aconsejarse alegremente a un abstemio que recurra al alcohol en beneficio de su salud; la mayoría tiene estupendas razones para justificar su abstinencia. Aun así hay excepciones. La persona con cardiopatía isquémica que pretende dejar todos sus malos hábitos: prescinde del tabaco, se pasa a la dieta espartana, empieza a hacer deporte y, con la mejor de sus intenciones, acaba con la sana costumbre de beber una cerveza o un vaso de vino cada noche. Deben desecharse estas privaciones. Por otro lado, las personas que beben poco pueden pensar en aumentar su dosis de alcohol para alcanzar el estándar diario, en concreto, los hombres mayores de 40 años y las mujeres que superan los 50 y que tienen un alto riesgo de padecer cardiopatía isquémica, pero, en cambio, un riesgo bajo de verse afectados por el alcoholismo o la cirrosis hepática. Las mujeres deben considerar otro efecto disuasorio: varios estudios asocian el consumo excesivo de alcohol —algunos lo asocian incluso con el consumo bajo— a un incremento del riesgo de padecer cáncer de pecho, enfermedad menos frecuente que las que afectan al corazón en mujeres posmenopáusicas, pero sin duda relevante. Las mujeres jóvenes, poco propensas a padecer cardiopatía isquémica a corto plazo, en realidad no se benefician de los efectos que el alcohol tiene sobre el sistema cardiovascular, por lo que el posible nexo entre alcohol y cáncer de pecho debería bastar para disuadirlas de consumir alcohol. En todo caso, para las mujeres, el límite máximo considerado medida moderada debería situarse en una bebida al día.

El único mensaje en claro que se obtiene de la relación entre alcohol y salud es que todos los que beben en exceso deberían reducir su consumo o abstenerse, al igual que cualquiera con antecedentes personales o familiares de alcoholismo o enfermedades hepáticas. Por lo demás, la mejor manera de evaluar los riesgos potenciales y los beneficios derivados del alcohol en cada persona es individualizando. El cirujano cardiovascular Roger R. Ecker y el autor elaboraron un algoritmo que puede ser de ayuda a los médicos y a sus pacientes para decidir cuánto alcohol, en su caso, es el adecuado para un individuo concreto (*véase el recuadro* "¿Beber o no beber? Esa es la cuestión").

En resumen, los médicos deberían orientar de forma objetiva y equilibrada a cada individuo en función de su consumo de alcohol. Estos consejos deberían confeccionarse a la medida de cada persona. Creo que es factible definir un límite claro y seguro de consumo de alcohol que pueda aportar un beneficio a un selecto segmento de la población. Los griegos propugnaban la moderación en todas las cosas. Tres décadas de investigaciones demuestran la vigencia de este lema.

LA BEBIDA: RIESGOS Y BENEFICIOS

Consumo de alcohol bajo/moderado		Consumo excesivo	
RIESGOS	**BENEFICIOS**	**RIESGOS**	**BENEFICIOS**
Definidos Consumo excesivo ***No definidos*** Cáncer de pecho Daños al feto ***Poco probable*** Cáncer de intestino Embolia Hipertensión arterial	***Probables*** Reducción del riesgo de padecer cardiopatía isquémica Reducción del riesgo de padecer accidentes isquémicos Reducción del riesgo de padecer colelitiasis ***Posibles*** Disminución del riesgo de afectación por diabetes mellitus Disminución del riesgo de padecer enfermedades vasculares periféricas (estrechamiento o taponamiento de las arterias que llevan la sangre a brazos y piernas)	***No cardiovasculares*** Cirrosis hepática Pancreatitis Determinados cánceres Accidentes Homicidios Suicidios Daños al feto Alteraciones degenerativas del sistema nervioso central ***Cardiovasculares*** Hipertensión arterial Arritmia Embolia Miocardiopatía (miocardio dañado)	Ninguno

Bibliografía complementaria

EL ALCOHOL EN EL MUNDO OCCIDENTAL. Bert L. Vallee en *Investigación y Ciencia*, págs. 56-61; agosto 1998.

ALCOHOL AND CORONARY HEART DISEASE. Giovanni Corrao, Luca Rubbiati, Vincenzo Bagnardi, Antonella Zambon y Kari Poikolainen en *Addiction*, vol. 95, n.º 10, págs. 1505-1523; octubre 2000.

ALCOHOL IN HEALTH AND DISEASE. Dirigido por Dharam P. Agarwal y Helmut K. Seitz. Marcel Dekker, 2001.

Un instrumento matemático universal: los invariantes

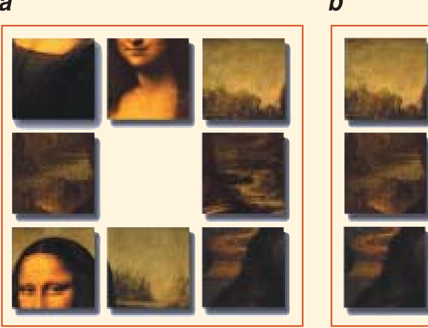
Merced a los invariantes, los matemáticos establecen parentescos entre objetos en un principio distintos. Por su ubicuidad constituyen poderosos instrumentos matemáticos de clasificación

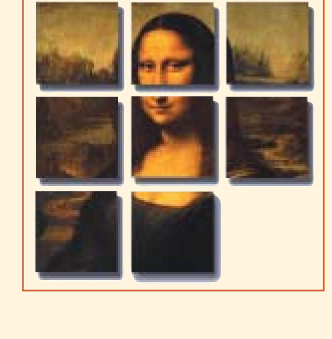
Anne Quéguiner-Mathieu

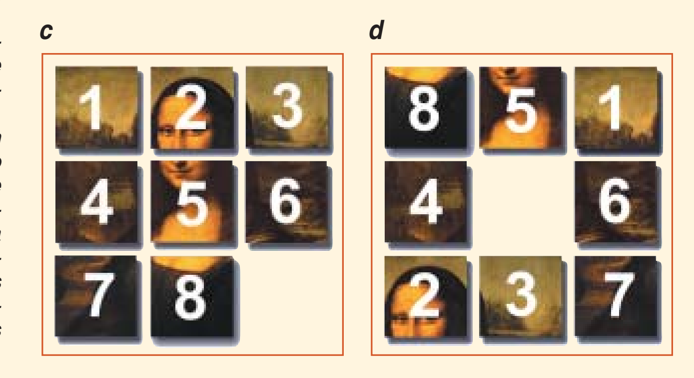
1. DESCUBRA EL INVARIANTE. Los tres problemas siguientes son resolubles sin recurrir a invariantes, pero éstos facilitan mucho la tarea. El primer problema se basa en un conocido rompecabezas, que consiste en reconstruir una imagen descompuesta en losetas dispuestas sobre las casillas de un tablero. Para desplazarlas de una casilla a otra han de pasar por la única casilla vacía del tablero. Este tipo de desplazamiento impide ciertas configuraciones de las piezas.

Pregunta 1: ¿Será posible reconstruir la Gioconda (*b*) a partir de la configuración (*a*)?

Respuesta*: No lo es. Para demostrarlo buscamos un invariante de los desplazamientos de las piezas. Numeremos de 1 a 8 las piezas de la Gioconda, yendo de izquierda a derecha y de arriba abajo* (c)*, y veamos qué secuencia forman estos números en la configuración desordenada* (d)*. Se obtiene la sucesión 8, 5, 1, 4, 6, 2, 3, 7. Calculamos el número de inversiones de esta secuencia, es decir, el número de veces en que cada cifra precede a otras de menor valor. He aquí la enumeración de las inversiones de la secuencia: (8, 5), (8, 1), (8, 4), (8, 6), (8, 2), (8, 3), (8, 7), (5, 1), (5, 4), (5, 2), (5, 3), (4, 2), (4, 3), (6, 2), (6, 3): un total de 15 inversiones. Se demuestra fácilmente, examinando los distintos casos, que en los desplazamientos de las piezas se conserva la paridad del número de inversiones. El número de inversiones de la posición deseada es igual a 0, o sea, par. La configuración desordenada, cuyo número de inversiones es impar, no puede, pues, ser una de las múltiples configuraciones obtenidas desde la Gioconda. Conclusión: si nuestro rompecabezas tuviera la configuración dada en el problema, podríamos tener la certeza de que hubo que desmontarlo para llegar a ella.*







Por sorprendente que pueda parecer, la actividad del matemático se asemeja en ocasiones a la del zoólogo: ha de enfrentarse a entes desconocidos que es necesario clasificar, ordenar en categorías, para conferirles una identidad. Entre los instrumentos disponibles en matemáticas a tal fin descuellan los invariantes. Los invariantes permiten la comparación de objetos matemáticos e indican su pertenencia —o no— a una misma familia.

El origen del vocablo "invariante" está vinculado a las transformaciones matemáticas. Para estudiar una familia de objetos matemáticos se busca qué puedan tener en común; la vía es la investigación de las transformaciones que permiten pasar de un objeto a otro. Los invariantes son características o propiedades de los objetos definidas por que no sufren modificación bajo dichas transformaciones. Así, para estudiar los polígonos del plano, podemos tomar como transformaciones las isometrías (transformaciones geométricas que, como las traslaciones y los giros, conservan las distancias y los ángulos). El área de un polígono es invariante por isometrías; por consiguiente, se agrupa en una subfamilia a todos los polígonos que tengan una misma área.

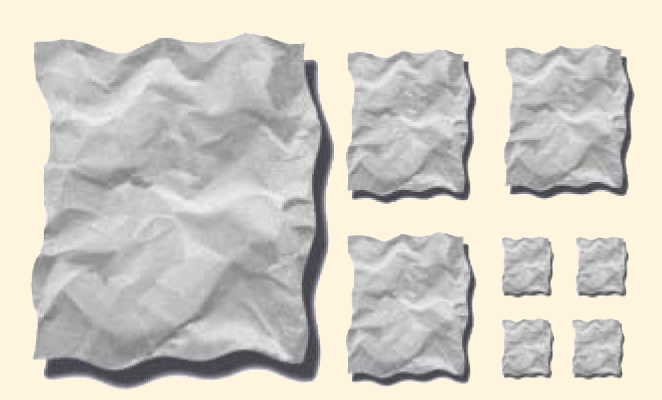
El concepto de invariancia viene de antiguo, mas no por ello han dejado de ser los invariantes de utilidad insustituible para los matemáticos. Más todavía, el papel fundamental de los invariantes en matemáticas ha llevado a ciertos autores a ver en ellos una medida de la eficacia en esta disciplina. Así, según el filósofo-matemático Dominique Lambert: "Sacar a luz clases ricas de invariantes constituye uno de los signos de la fecundidad potencial de una teoría matemática".

Sea como fuere, los invariantes suscitan un número de cuestiones suficiente como para que ciertos matemáticos no se contenten con utilizarlos, sino que los conviertan en auténtico objeto de estudio. Así ocurre en el caso de los invariantes de los cuerpos algebraicos (conjuntos estructurados, entre ellos los números racionales, los reales...). Desde hará unos cuarenta años, agita este campo de las matemáticas el debate acerca del valor de cierto invariante, definido por Irving Kaplanski. Varios matemáticos han resuelto parcialmente la cuestión en estos últimos años.

Por otra parte, Vladimir Voedovski fue galardonado en 2002 con la medalla Fields por un trabajo sobre invariantes.

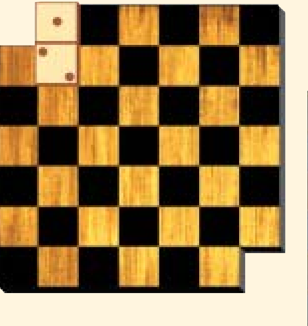
Los invariantes de los nudos

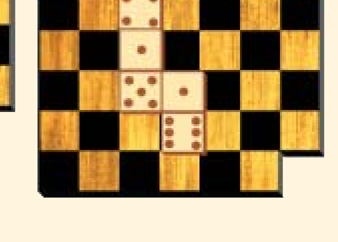
La teoría de nudos ilustra el papel de los invariantes en las matemáticas. Los nudos aparecieron con carácter de objetos matemáticos en 1771, en los trabajos de Vandermonde. Permanecieron después en suspenso durante un siglo, hasta que Lord Kelvin vio en ellos un medio para reconciliar la concepción continua de la materia con la existencia de los átomos: los átomos serían nudos en el éter (fluido que se suponía ocupaba la totalidad del espacio y servía de medio de propagación de la luz). Para comprender los problemas que los nudos plantean, partamos de un cordel anudado (*a*) y preguntémonos si es posible transformarlo en (*b*).



Pregunta 2: Se rompe en cuatro trozos un papel; se rompe después en cuatro uno de los trozos, y así sucesivamente. ¿Llegaremos a tener 338 pedazos de papel?

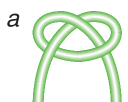
***Respuesta**: No. Al romper en cuatro uno de los trozos lo que hacemos es aumentar en tres los ya existentes. Así pues, el resto de la división por 3 del total de papeles no cambia tras la fragmentación de uno de ellos: es un invariante. Como el resto era igual a 1 al comienzo (1 dividido por 3 tiene cociente 0 y resto 1), el resto de la división de 338 entre 3 tendría que ser 1. Pero es igual a 2.*

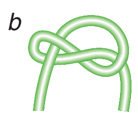




Pregunta 3: Se recortan de un tablero ajedrezado de 7×7 dos casillas diagonalmente opuestas. ¿Es posible recubrir el tablero resultante con piezas de dominó, cada una de las cuales cubra dos casillas?

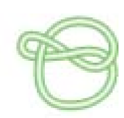
***Respuesta**: No. Cada pieza de dominó cubre en el tablero una casilla negra y una blanca; por lo tanto, la diferencia entre el número de casillas blancas y negras no varía tras colocar una pieza: es el invariante. Las casillas eliminadas estaban en la misma diagonal y ambas eran negras; el valor de la diferencia invariante, por lo tanto, es 2. Pero el recubrimiento sólo es factible si esa diferencia es 0 (es decir, si hay tantas casillas negras como blancas).*





Unas cuantas tentativas nos convencerán sin tardanza de que la única forma de pasar del primero al segundo de los nudos consiste en desanudarlo y volver a anudarlo después. Ahora bien, si se admitiera esta operación todos los nudos serían equivalentes. Por esta razón, los nudos matemáticos se definen como un pedazo de cuerda cuyos cabos quedan unidos tras haberlos anudado de cierta manera. Los nudos anteriores quedan entonces representados mediante los diagramas siguientes:





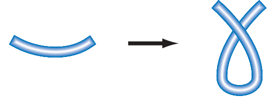
El diagrama de la izquierda representa el nudo en trébol, y el de la derecha, el nudo en ocho. Ni la longitud de la cuerda ni su posición en el espacio modifican el modo en que ha sido anudada. Supondremos que la cuerda es flexible y extensible; consideraremos como transformación toda deformación continua durante la cual no se corte la curva.

Tait (1831-1901) fue publicando a partir de 1877 las primeras tablas en las que se proponía una clasificación de los nudos. Planteaban ya un problema que no ha cesado de incomodar a los matemáticos: si bien es fácil representar un nudo mediante un diagrama, resulta, por el contrario, mucho más difícil decidir si dos diagramas representan al mismo nudo, como podemos comprobar en la figura 2, donde se muestran varios diagramas diferentes del nudo en trébol.

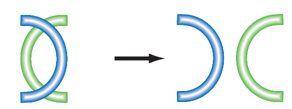
Para diferenciar dos diagramas, los matemáticos se han esforzado en descubrir invariantes de los nudos, es decir, objetos matemáticos asociados a los nudos que no se vean afectados por las transformaciones y que, por consiguiente, no dependan del diagrama elegido para representar el nudo. Así, para elaborar su clasificación, el propio Tait descubrió que el número de cruzamientos —que se define como el mínimo número de cruces de líneas de los diagramas representativos del nudo— es un invariante. El nudo en trébol, por ejemplo, es un nudo de tres cruzamientos.

Sin embargo, aunque Tait demostró que su lista contenía la totalidad de los nudos con menos de seis cruzamientos, su justificación de que los nudos de la lista eran distintos dos a dos fue meramente empírica. Aunque agrupó numerosas formas que ofrecían diferente aspecto en el seno de familias de equivalencia, él mismo reconoció que le era imposible garantizar que dos familias no representasen un mismo nudo. No disponía a la sazón de útiles que le permitieran elaborar rigurosamente una clasificación así.

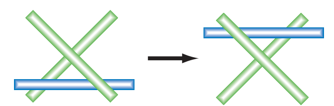
A Reidemeister (1893-1971) se debió, en 1948, un progreso definitivo: halló un criterio que determinaba la equivalencia de dos diagramas. Definió tres transformaciones que cabe aplicar a un diagrama sin que varíe el nudo que representa. Consiste la primera en introducir o eliminar un bucle:



La segunda, en introducir o eliminar dos cruzamientos gemelos:

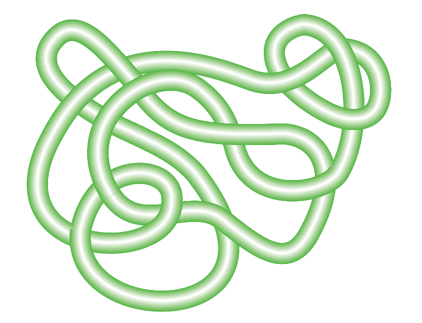


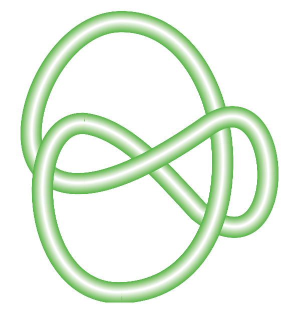
y la tercera, en transferir un segmento al otro lado de un cruzamiento.

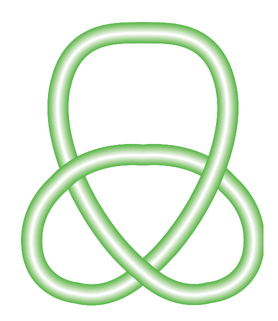


Reidemeister demostró que dos diagramas no son más que representaciones de un mismo nudo si es posible pasar de uno a otro efectuando cierto número de veces las transformaciones anteriores. Si bien esta técnica es eficaz para verificar que dos diagramas son representaciones de un mismo nudo, no permite, en cambio, demostrar que dos diagramas constituyen representaciones de nudos distintos, por la sencilla razón de que no sabemos cuándo hemos de abandonar nuestras tentativas de transformación.

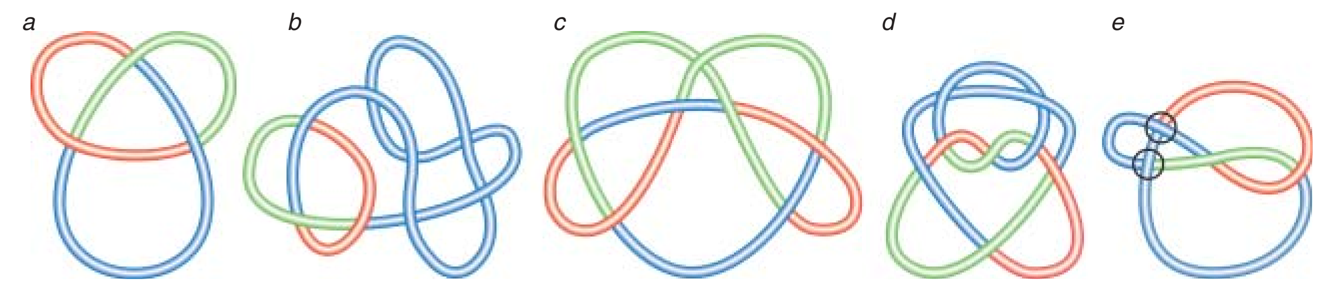
A pesar de este inconveniente, el método de Reidemeister supuso un progreso determinante: permitió definir invariantes de los nudos. Tenemos un ejemplo, ideado por Richard Fox, en la tricoloración de nudos. Se dispone de tres colores y se quiere colorear un diagrama, utilizando al menos dos colores, de suerte que cada tramo, es decir, cada arco conexo, sea de un solo color y que en cada cruzamiento encontremos, o bien







2. TRES NUDOS EQUIVALENTES. Los dos primeros nudos se pueden transformar, sin cortar la cuerda, en un nudo en trébol (*a la derecha*).



3. PARA "TRICOLOREAR" UN NUDO, se pintan las porciones de cuerda comprendidas entre dos cruces —no necesariamente consecutivos— con colores distintos. Si son suficientes dos o tres colores para colorear el nudo sin que haya cruzamientos de dos colores, se dice que el nudo es "tricoloreable". El nudo en trébol (*a*) y los nudos (*b*), (*c*) y (*d*) son tricoloreables. El nudo (*e*) no lo es: los cruces señalados con círculos sólo requieren dos colores. La posibilidad de tricoloración es un invariante del nudo; es decir: un nudo tricoloreable no es equivalente a un nudo no tricoloreable. Por esta razón, el nudo en trébol y el nudo en forma de 8 son distintos.

los tres colores, o bien sólo uno de ellos (*véase la figura 3*). Es bastante sencillo comprobar que si un diagrama es tricoloreable, es decir, si es posible colorearlo respetando las reglas enunciadas, todos los demás diagramas que se puedan obtener aplicando las operaciones de Reidemeister lo serán también. Esto prueba que la posibilidad de tricoloración es un invariante del nudo, y no tan sólo del diagrama.

Gracias a la tricoloración se puede demostrar que el nudo en trébol y el nudo en ocho son distintos. En efecto, si fueran iguales se podría pasar de un diagrama al otro utilizando las operaciones de Reidemeister. En tal caso, o bien serían ambos tricoloreables, o ninguno de los dos lo sería. Ahora bien, ensayados exhaustivamente todos los coloreados posibles se observa que el diagrama del nudo en ocho no es tricoloreable, mientras que el del nudo en trébol sí lo es. Por consiguiente, se trata de nudos distintos (*véase la figura 3*).

No resulta difícil percibir intuitivamente que el nudo en ocho y el nudo en trébol son distintos, pero también en este caso, como siempre, hay que demostrarlo. Las primeras demostraciones rigurosas disponibles datan, empero, de principios del siglo XX, y se fundan en el cálculo de invariantes. La basada en la tricoloración aquí presentada es más reciente, y puede que una de las más sencillas. Estas técnicas son más elaboradas que las del siglo XIX; por otra parte, han puesto de manifiesto algunos errores en las tablas de clasificación de Tait y sus contemporáneos.

Los invariantes, al completo

Aunque los invariantes nodales explicados hasta ahora proporcionan abundante información de gran valor, no permiten, sin embargo, una clasificación exhaustiva de los nudos. Para las formas cuadráticas, en cambio, sí se dispone en ciertos casos de un sistema completo de invariantes, es decir, de un sistema de invariantes que basta para la caracterización de cualquier forma cuadrática, de modo que dos formas cuadráticas serán equivalentes si y solamente si sus invariantes son iguales.

Una forma cuadrática sobre un cuerpo (un cuerpo es un conjunto de elementos en el que se pueden efectuar las operaciones habituales, la adición, la multiplicación, la división) es un polinomio homogéneo de grado 2 en las variables $x_1, x_2, ..., x_n$, donde el número n es un entero cualquiera: $a_{11}x_1^2 + a_{12}x_1x_2 + ... + a_{1n}x_1x_n + + ... + a_{nn}x_n^2$. Dos formas cuadráticas son equivalentes si es posible pasar de una a otra mediante un cambio de variables lineal e invertible. Por ejemplo, $x_1^2 + + x_1x_2 + x_2^2$ es equivalente a $t_1^2 + 3t_2^2$ tras tomar como nuevas variables $t_1 = x_1 + x_2/2$ y $t_2 = x_2/2$. Efectuando cambios de variable de este tipo siempre es posible expresar una forma cuadrática en forma diagonal: $a_1x_1^2 + a_2x_2^2 + ... + a_nx_n^2$, expresión donde $a_1 ... a_n$ son elementos no nulos del cuerpo. Vamos ahora a examinar invariantes de estas formas cuadráticas.

El primer invariante que se puede asociar a las formas cuadráticas es la dimensión, igual al número de variables que intervienen en la expresión del polinomio, y por consiguiente, igual al número de coeficientes no nulos de su expresión diagonal. En el cuerpo de los números complejos este invariante es suficiente para clasificar las formas cuadráticas. En efecto, todas las formas posibles e imaginables de dimensión n, $a_1x_1^2 + + a_2x_2^2 + ... + a_nx_n^2$ se fusionan en el cuerpo complejo para dar tan sólo una sola y única forma. Con el cambio de variables $x_i = t_i/\alpha_i$, donde $\alpha_1, ..., \alpha_n$ verifican $\alpha_i^2 = a_i$, las formas cuadráticas se expresan $t_1^2 + ... + t_n^2$. Así pues, todas las formas cuadráticas de dimensión n son equivalentes. En el cuerpo de los números complejos la clasificación ha terminado, y la dimensión constituye, por sí sola, un sistema completo de invariantes.

La situación es un poco diferente en el cuerpo de los números reales, porque en él sólo admiten raíces cuadradas los números positivos. Cuando alguno de los coeficientes a_i del polinomio es negativo, no existe ningún real α_i tal que $\alpha_i^2 = a_i$. Para eludir esta difi-

La autora

ANNE QUEGUINER-MATHIEU es matemática en la Universidad París 13.

LA CLASIFICACION DE LAS FORMAS SEGUN LOS CUERPOS

Los invariantes sirven para clasificar las formas cuadráticas (por ejemplo, $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$) y la clasificación depende del cuerpo sobre el que estén definidas. En el cuerpo de los números complejos, el invariante "dimensión", igual al número de términos cuadrados de la forma "reducida" (en la cual todos los coeficientes son iguales a 1), basta para clasificar las formas. En el cuerpo de los números reales hay que añadir la "signatura", el número de coeficientes positivos. En un cuerpo finito (un cuerpo cuyo conjunto de elementos es finito) es necesario además el "discriminante".

El discriminante Δ es igual al producto de los coeficientes $a_1 \ldots a_n$, abstracción hecha de un factor igual a cualquier elemento del cuerpo elevado al cuadrado; es decir: dos discriminantes cuyo cociente sea un cuadrado se consideran iguales. Así, en el ejemplo de aquí abajo, las formas $x^2 + y^2 + z^2 + 3t^2$ y $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$ tienen, respectivamente, los discriminantes 3 y –1. El cociente de ambos es –3 módulo 7 (se trata de un cuerpo de siete elementos), o sea 4, que es un cuadrado. Estas dos formas tienen pues el mismo discriminante. Como los invariantes que acabamos de explicar constituyen un sistema completo en cada uno de los cuerpos considerados, de los valores de los invariantes se deduce si las formas son equivalentes o no: las tres formas de la tabla son equivalentes sobre el cuerpo de los números complejos, la segunda y la tercera lo son sobre el cuerpo de los reales, y la primera y la tercera, sobre el cuerpo de siete elementos.

Los tres primeros invariantes que intervienen en la conjetura de Milnor se definen a partir de la dimensión, del discriminante y de un tercer invariante, el invariante de Hasse, que está dado por un álgebra no conmutativa (el resultado de una multiplicación puede depender del orden de los factores) cuyos elementos se definen a partir de los coeficientes de las formas cuadráticas.

CUERPO	$\mathbb{C}$	$\mathbb{R}$		CUERPO DE 7 ELEMENTOS = {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}	
FORMAS CUADRATICAS / INVARIANTES	DIMENSION	DIMENSION	SIGNATURA	DIMENSION	DISCRIMINANTE
$x^2 + y^2 + z^2 - t^2$	4	4	3	4	– 1
$x^2 + y^2 + z^2 + 2t^2$	4	4	4	4	2
$x^2 + y^2 + z^2 + 3t^2$	4	4	4	4	3 (= –1)

cultad, las formas cuadráticas se descomponen en dos partes, una con los coeficientes positivos, y la otra, con los negativos: $a_1x_1^2 + a_2x_2^2 + \ldots + a_rx_r^2 - a_{r+1}x_{r+1}^2 - \ldots - a_nx_n^2$ (ahora todos los coeficientes a_i son positivos, y r es el número de los coeficientes que lo eran inicialmente). Un cambio de variable del mismo tipo que en el caso complejo conduce a una expresión sin coeficientes: $t_1^2 + \ldots + t_r^2 - t_{r+1}^2 - \ldots - t_n^2$.

No basta, pues, con dar la dimensión de una forma cuadrática —el número de variables distintas que contiene— si se quiere caracterizarla en el cuerpo de los números reales. Para conferir a una forma su identidad se debe también detallar el número de términos positivos y negativos de que consta su expresión reducida diagonal. La signatura de una forma cuadrática $a_1x_1^2 + a_2x_2^2 + \ldots + a_nx_n^2$ se define como el número r de coeficientes a_i que son positivos. El matemático inglés Sylvester (1814-1897) demostró que la signatura es un invariante, es decir, que dos formas cuadráticas equivalentes tienen la misma signatura. La dimensión y la signatura definen de manera unívoca a cada familia de formas; estos dos datos constituyen un sistema completo de invariantes para las formas cuadráticas sobre el cuerpo de los números reales.

Se dispone desde hace largo tiempo de sistemas completos de invariantes que permiten la clasificación de las formas cuadráticas sobre otros cuerpos, como los que constan de un número finito de elementos, o incluso el de los números racionales. Vladimir Voevodsky recibió en agosto pasado la medalla Fields en razón, sobre todo, de su demostración de la conjetura de John Milnor, que afirma la existencia de un sistema completo de invariantes para las formas cuadráticas, cualquiera que sea el cuerpo sobre el que estén definidas.

Sin embargo, estos invariantes resuelven sólo de modo imperfecto el problema de la clasificación de las formas cuadráticas. Existe, en efecto, un rasgo que distingue a parte de ellos de los mencionados anteriormente: son "relativos". Con mayor precisión: existen tres invariantes válidos para todas las formas cuadráticas, pero no bastan para clasificarlas. Para completar la clasificación se les adjuntan otros invariantes que no están definidos sobre el conjunto de las formas cuadráticas: el primero está definido para las formas cuyos tres invariantes universales son nulos, el segundo, para aquellas en las que los cuatro invariantes son nulos, y así sucesivamente. Si se considera el conjunto de las formas para las cuales los tres invariantes universales toman tres valores dados, al menos uno de los cuales es no nulo, encontramos en general varias clases de equivalencia distintas. Ahora bien, los invariantes superiores no están definidos para las formas de este conjunto. No proporcionan, pues, un etiquetado de las diferentes clases de equivalencia. Existe, en cambio, un procedimiento que utiliza esos invariantes y determina si dos formas son equivalentes: se considera la diferencia de ambas y se

comprueba que los invariantes de esa nueva forma son todos nulos.

Invariantes de los cuerpos algebraicos

Los matemáticos no leen los posos del té. Si bien algunas de las conjeturas que formulan son posteriormente verificadas, otras, por el contrario, se ven refutadas. Tenemos un ejemplo en los cuerpos algebraicos y sus invariantes. Hemos de pedir perdón a Irving Kaplansky por valernos de una conjetura suya, errónea, con el fin de ilustrar nuestros propósitos. Se refiere a un invariante de los cuerpos definido por el propio Kaplansky, el *u*-invariante. Su enunciado, aunque sencillo, nos obliga a dar un rodeo y hablar de otro invariante de los cuerpos, el nivel.

El nivel permite dar respuesta a esta pregunta: dado un cuerpo, ¿es posible expresar –1 como una suma de cuadrados de elementos de este cuerpo? Dicho de otro modo, ¿existen en este cuerpo elementos $c_1, ..., c_s$ tales que la suma de sus cuadrados sea igual a –1 ($c_1^2 + + ... + c_s^2 = -1$)? Si tal es el caso, el nivel es el número de estos elementos (si existen varios conjuntos de números c_i el nivel está determinado por el menor de esos conjuntos). En el caso en que, por el contrario, no exista ninguna solución, se dice que el cuerpo es de nivel infinito. Veamos varios ejemplos. El cuerpo de los números reales es de nivel infinito, pues en él una suma de cuadrados es siempre positiva. El cuerpo de los números complejos es de nivel 1, porque basta elevar al cuadrado un solo número, la unidad imaginaria *i*, para obtener el número –1 ($i^2 = -1$). Los cuerpos que constan de un número finito de elementos serán necesariamente de nivel 1 o de nivel 2. En el caso, por ejemplo, de un cuerpo de siete elementos, denotado {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}, donde el resultado de las operaciones se calcula módulo 7 ($3^2 = 2$; $2^2 + 3^2 = 4 + + 2 = 6 = -1$, ya que $6 + 1 = 0 = -1 + 1$), el nivel es 2. Así es porque ninguno de los elementos tiene cuadrado igual a –1, y por otra parte –1 se descompone en suma de dos cuadrados: $-1 = 2^2 + 3^2$. El nivel es un invariante de los cuerpos. En efecto, las transformaciones invertibles que se estudian en este contexto, los isomorfismos de cuerpos, conservan las operaciones, en particular la adición y la multiplicación. Una transformación de ese tipo convierte una descomposición de –1 en suma de cuadrados en un cuerpo en otra descomposición de igual longitud en otro cuerpo. Por lo tanto, si podemos pasar de un cuerpo a otro, y recíprocamente, mediante tales transformaciones, ambos cuerpos tendrán el mismo nivel.

Podemos volver ahora al *u*-invariante. Si el cuerpo es de nivel finito, se puede demostrar que existe un entero, el *u*-invariante, tal que los valores de las formas cuadráticas de dimensión mayor que el *u*-invariante no sólo puedan ser iguales a –1, sino a cualquier otro elemento del cuerpo. Dicho de otro modo, toda ecuación de la forma $a_1x_1^2 + ... + a_nx_n^2 = b$ tiene solución, cualesquiera que sean los valores de los coeficientes a_i y de b, siempre que el número n de variables sea por lo menos igual al *u*-invariante. Tales formas cuadráticas son llamadas universales; de aquí el nombre de *u*-invariante.

El *u*-invariante no puede ser menor que el nivel; en ocasiones, ambos valores son iguales, como en el caso de los números complejos o en el del cuerpo de siete elementos. Por otra parte, no siempre es así. Por ejemplo, el cuerpo de cinco elementos en el que se calcula módulo 5 es de nivel 1, porque $2^2 = -1$, pero su *u*-invariante es 2: la ecuación $x_1^2 = 3$ no tiene solución, mientras que $a_1x_1^2 + a_2x_2^2 = b$ tiene siempre una solución, como, *a fortiori,* las tienen las ecuaciones que hacen intervenir mayor número de variables.

¿Son los *u*-invariantes números con alguna propiedad distintiva? En 1953, Kaplanski conjeturó que los *u*-invariantes son siempre, cualquiera que sea el cuerpo considerado, potencias de 2: 1, 2, 4, 8, 16... Albrecht Pfister demostró poco después otro resultado en el mismo sentido: el *u*-invariante no es nunca igual a 3, 5, o 7. Demostró además que el nivel de un cuerpo es siempre una potencia de 2. En vista del vínculo existente entre nivel y *u*-invariante, este resultado apoyaba la conjetura de Kaplanski. Su conjetura parecía ser verdadera, pero en 1988 Alexander Merkurjev construyó un cuerpo cuyo *u*-invariante vale 6. No tardarían en llegar otros cuerpos cuyo *u*-invariante no es una potencia de 2: Merkurjev construyó cuerpos en los que el *u*-invariante puede tomar cualquier valor par, y lo que es todavía más sorprendente, Izhboldin demostró en 1999 la existencia de un cuerpo cuyo *u*-invariante era igual a 9. La existencia de cuerpos cuyos *u*-invariantes sean números impares mayores que 9 es una cuestión que sigue en espera de solución.

Ni el nivel ni el *u*-invariante, aunque se trata de invariantes de los cuerpos, llegan a desempeñar el mismo papel que los invariantes antes mencionados. La estructura de cuerpo es demasiado rica para que se pueda esperar sin más una clasificación completa de los cuerpos por medio de invariantes asociados a las formas cuadráticas. A pesar de ello, estos invariantes nos proporcionan datos preciosos sobre el comportamiento de las formas en ciertos cuerpos; por esta razón, ofrecen una ayuda muy valiosa a quienes estudian o utilizan formas cuadráticas. Así pues, a pesar de que no disponemos de un sistema completo que permita llegar a una clasificación, el invariante sigue siendo un útil indispensable. Nos permite progresar, de forma a veces decisiva, en nuestros conocimientos de los objetos a los que está asociado.

Bibliografía complementaria

REMARQUES SUR LES PROBLÈMES DE SITUATION. A. Vandermonde, en *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, pág. 566-574, 1771.

FIELDS OF *U*-INVARIANT 9. O. Izhboldin, en *Annals of Mathematics*, vol. 154, n.º 4, págs. 529-587, 2001.

LA THÉORIE DES NOEUDS. E. Bayer, 171e Conférence de l'Université de Tous les Savoirs, vol. 13, 2002.

LA SCIENCE DES NOEUDS, Belin-Pour la Science, 2002.

Catálisis

Aceleran reacciones biológicas o seleccionan compuestos especulares, son grandes moléculas orgánicas o materiales porosos: el mundo de los catalizadores es muy variado

Avelino Corma y Hermenegildo García

La catálisis es la parte de la química que trata de conseguir en un proceso el máximo grado de transformación y la mayor selectividad en el producto en el menor tiempo posible. Desde que Berzelius acuñó en 1835 la palabra *catálisis* (del griego *katalyein,* que significa disminuir la fuerza o ablandar y se refiere aquí a la resistencia que ofrece la sustancia a sufrir transformación en un proceso), la disciplina se ha ido consolidando como una rama independiente dentro de la química. Los efectos de la presencia de platino y otros metales nobles en la combustión del hidrógeno fueron la primera demostración inequívoca de que ciertas sustancias (*catalizadores*) influían en la velocidad a la que transcurría un proceso, pero sin intervenir en la estequiometría del mismo (es decir, en las proporciones de reactivos y productos). Más tarde quedó claro que el catalizador no afectaba a la termodinámica de la reacción y, por tanto, no alteraba la constante de equilibrio de un proceso ni la concentración máxima de producto que podía alcanzarse en unas condiciones determinadas; sólo aumentaba la velocidad a la que transcurría la transformación.

Así, se demostró que la combustión de hidrógeno, estudiada por Döbereiner en 1820, no tiene lugar en grado apreciable cuando se mezclan sin más H_2 y O_2; en cambio, estos gases reaccionan explosivamente en presencia de una esponja de platino. La hidrogenación/deshidrogenación sigue figurando entre los procesos que más atención reciben en catálisis, dada la extrema lentitud con la que ocurre en ausencia de catalizador.

Las enzimas en las catálisis

Las enzimas son los ejemplos más perfectos que se conocen de catalizador ideal, por su máxima selectividad y especificidad y las condiciones tan suaves en que actúan. La velocidad de una reacción aumenta con la concentración de los reactivos y con la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso. La mayoría de los procesos biológicos deben desarrollarse en sustratos muy diluidos y a temperatura ambiente; transcurren en condiciones sumamente desfavorables por lo que se refiere a su velocidad y requieren un catalizador muy eficaz. Las enzimas aumentan la velocidad del proceso hasta un millón de veces, manteniendo una alta especificidad.

Para explicar de una forma gráfica esa gran especificidad, se ha desarrollado el concepto de llave/cerradura: sólo un pequeño número de sustratos, cuya forma molecular se adapta perfectamente a la geometría y dimensiones del centro activo de la enzima, pueden sufrir la transformación catalítica. Se calcula que la vida sobre la Tierra moviliza decenas de miles de enzimas diferentes, la inmensa mayoría de las cuales no han sido aún aisladas y cuyos ciclos catalíticos son todavía desconocidos. Sólo se ha determinado por ahora el mapa de la estructura molecular del centro activo de unas trescientas enzimas. Los pesos moleculares de las enzimas son altísimos —superan ampliamente los 100.000 dalton, o doceavas partes de la masa del carbono 12—; el número de átomos implicados es tan grande, que la resolución de la estructura de una enzima a nivel atómico es un problema de magnitud colosal.

Las enzimas son capaces de realizar con una alta eficiencia y selectividad transformaciones que continúan siendo imposibles de emular para la química de principios del siglo XXI. No obstante, se ha logrado diseñar nuevos catalizadores biológicos que incluso mejoran el comportamiento de una enzima natural. Destacan la reproducción parcial de la acción del citocromo P450 y los catalizadores de la serie Gif desarrollados por Barton en el decenio de 1980. Un grupo de la empresa Monsanto ha desarrollado una sinzima (enzima sintética) que mimetiza la acción de las superoxidodismutasas, enzimas que descomponen los aniones superóxido O^{2-} resultantes de la metabolización del oxígeno y cuya abundancia excesiva puede conducir a infartos o artritis.

Los investigadores de la catálisis inorgánica no hemos llegado aún a ese punto. Una posible razón es que quienes se dedican a las enzimas empezaron hace más de 30 años a estudiar la estructura molecular de

sus catalizadores mediante técnicas *in situ* que les han permitido profundizar en la comprensión de la naturaleza de los centros activos y de los mecanismos de reacción. Este no ha sido el caso de la catálisis inorgánica, donde sólo en los últimos diez años se ha prestado una verdadera atención a los estudios mediante técnicas *in situ*.

Catálisis homogénea

Como ya se ha indicado, la hidrogenación en presencia de un metal noble es un ejemplo típico de reacción catalítica. Un avance sustancial en este campo fue el desarrollo de catalizadores de hidrogenación basados en complejos metálicos solubles en disolventes orgánicos; la catálisis se producía así en fase homogénea. Entre ellos destacan los complejos de rodio(I), como el clorotris(trifenilfosfina)rodio(I), inicialmente desarrollado por G. Wilkinson en el Colegio Imperial de Londres; posteriormente, mediante el empleo como ligandos (grupos de átomos ligados a un grupo central) de difosfinas (H_2P-L-PH_2) ópticamente activas, se han desarrollado catalizadores de hidrogenación con una enantioselectividad prácticamente del 100 %.

El enantiomorfismo consiste en la existencia de dos moléculas, los enantiómeros, que son la imagen especular la una de la otra. En la enantioselectividad el catalizador acelera la ruta que conduce a la formación de un solo enantiómero; la que lleva al otro está desfavorecida, o no ocurre, a causa de la acción del catalizador enantioselectivo. Las propiedades físicas y químicas de los enantiómeros son idénticas, salvo aquellas que se miden o llevan a cabo en un entorno quiral, es decir, que distinga entre izquierda y derecha; las transformaciones enantioselectivas, pues, implican el máximo grado de selectividad en una reacción química.

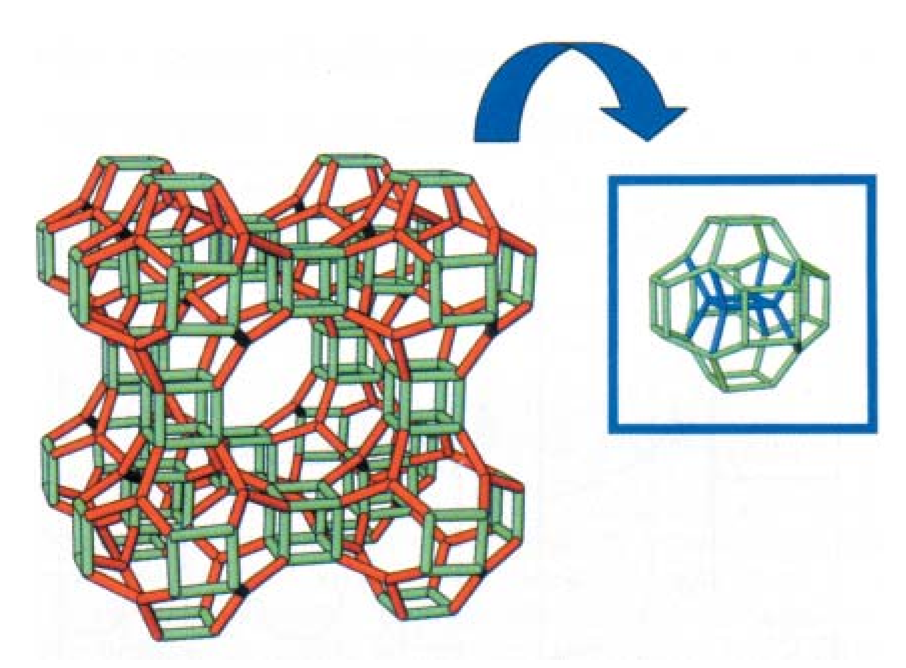
Existen tres aproximaciones para la síntesis selectiva de enantiómeros (denominada también *síntesis asimétrica*). En la primera se parte un sustrato que ya sea enantioméricamente puro y se llevan a cabo transformaciones químicas que no afecten al centro responsable de la asimetría de la molécula (el "centro quiral").

La segunda posibilidad consiste en modificar el sustrato enlazándole de manera covalente un auxiliar quiral que introduzca asimetría en la molécula y no participe en ninguna de las transformaciones sufridas por el sustrato. Por lo normal, para reutilizarlo en nuevos ciclos, se recupera al final de la síntesis el auxiliar inalterado mediante la rotura del enlace covalente en el producto final. Esta estrategia también requiere, sin embargo, el empleo de cantidades estequiométricas, que, como en el caso anterior, de ordinario tendrá su origen en algún producto natural.

La tercera estrategia para la síntesis enantioselectiva es la más potente; todavía existen escasos ejemplos con aplicación práctica. Se basa en un proceso catalítico donde la comunicación espacial entre el centro activo asimétrico del catalizador y el sustrato transmite la quiralidad del catalizador al producto. Esta es la única modalidad de síntesis asimétrica donde se produce una multiplicación real de la quiralidad y unas cantidades pequeñas de un centro quiral presente en el catalizador conducen a cantidades mucho mayores de producto enantioméricamente puro.

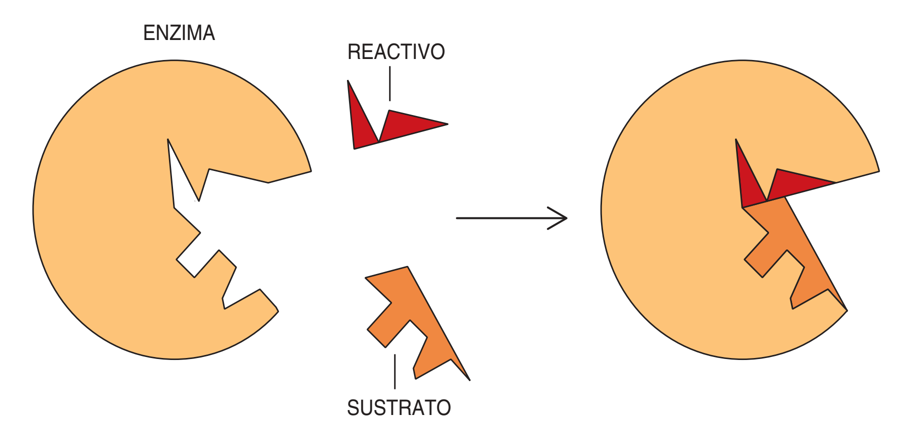
Como la similitud entre enantiómeros es tan grande que su separación resulta complicadísima, cuando no imposible, para que un catalizador enantioselectivo tenga posibilidades de aplicación real los excesos enantioméricos deben ser superiores al 90 %. A pesar del masivo esfuerzo investigador en este campo de la catálisis enantioselectiva, generalmente mediante complejos metálicos, se puede considerar que los éxitos no pasan de limitados. Aparte de las reacciones de hidrogenación enantioselectivas por medio del complejo de Wilkinson modificado, otro catalizador que induce una reacción con una enantioselectividad prácticamente total es el que idearon K. B. Sharpless (premio Nobel de química 2001) y T. Katsuki en los años ochenta, basado en el tartrato de titanio. Este catalizador funciona adecuadamente para alcoholes alílicos, (con grupos alilo, $CH_2 = CH–CH_2–$), pero es ineficaz para hidrocarburos u otro tipo de sustratos que, conteniendo dobles enlaces C=C, no posean un grupo hidroxi (–OH) en la posición adecuada.

A pesar de estas limitaciones, el catalizador de Katsuki-Sharpless supuso un hito significativo en el campo de las reacciones enantioselectivas. Se aplica en la epoxida-



1. LA ZEOLITA ITQ-21 es un nuevo catalizador inorgánico sintético que podría aplicarse a la obtención de productos valiosos en las primeras fases del refino de hidrocarburos. La eficacia le viene de la amplitud de sus poros. Aquí se ve la celda unitaria.

AVELINO CORMA *et al.*, *Nature*



2. LA FORMA DEL CENTRO ACTIVO de una enzima se corresponde extremadamente bien, de manera complementaria, con la forma del sustrato y del reactivo requerido en el proceso bioquímico (cofactor).

A. CORMA Y H. GARCIA

ción (conversión en un compuesto que tenga un anillo de dos carbonos y un oxígeno) enantioselectiva de los alcoholes alílicos; sin embargo, ha originado el desarrollo de una línea exitosa de investigación encaminada a conseguir también la epoxidación enantioselectiva de cualquier otro tipo de alqueno (hidrocarburo de molécula lineal con dobles enlaces entre carbonos, como el propileno). De esta manera, una continuación lógica del sistema de Katsuki-Sharpless ha sido la serie de catalizadores quirales de Mn(III)-salen [salen equivale a bis(2,4-diterbutilsalicilidenimino)ciclohexano] y complejos análogos desarrollados por E. N. Jacobsen y T. Katsuki en los años 90. Los excesos enantioméricos que se consiguen con estos catalizadores en la epoxidación de alquenos mono– o disustituidos (con uno o dos átomos cambiados) son excelentes.

Aunque el mecanismo no se conoce todavía en todos sus detalles, se ha propuesto que la importante comunicación estérica entre el catalizador y el sustrato —la adaptación de la forma de aquél a éste, que determina a su vez la forma del producto— se deriva de una aproximación lateral del alqueno sobre la forma activada del complejo Mn por el lado menos impedido del catalizador, que es prácticamente plano: sólo es posible aproximarse al átomo Mn por un lado, porque el otro, protegido por el ligando, no es accesible. Por ello, la presencia de sustituyentes voluminosos, como los grupos tert-butilo [$(CH_3)_3C$–], sobre los anillos aromáticos del ligando salen, favorece enormemente la transmisión de la quiralidad al obligar la aproximación del alqueno por el lado opuesto. Apoya esta imagen mecanicista el hecho de que un complejo análogo sin grupos tert-butilo posea una capacidad de inducción asimétrica bastante menor. Más recientemente, se ha descrito la inmovilización de complejos quirales del tipo Mn-salen (*como se ve en la figura 4*) en el interior de tamices moleculares de zeolita, tipo de catalizador al que volveremos más adelante.

Otros complejos metálicos que han demostrado una enorme potencialidad como catalizadores de reacciones enantioselectivas, incluidas hidrogenaciones y oxidaciones, son los que se basan en ligandos que contienen la subestructura 2,2'–binaftilo (BINAP), desarrollados inicialmente por R. Noyori (premio Nobel de química 2001). Otros ligandos que han demostrado después una gran eficacia en la transmisión de la quiralidad son las bisoxazolidinas.

A muy corto plazo se espera que se realice un esfuerzo importante en el desarrollo de compuestos quirales con alta actividad biológica. Parece probable que en diez años no se utilicen plaguicidas ni productos farmacéuticos en forma racémica (con cantidades iguales de cada enantiómero), sino sólo aquellos estereoisómeros (moléculas idénticas salvo por su disposición espacial) que presenten la actividad biológica deseada. La preparación de estos estereoisómeros puros requerirá de nuevos catalizadores con una arquitectura molecular muy definida y, quizá, con un coste económico más elevado. Resulta, pues, evidente la necesidad de nuevos métodos que permitan separar el catalizador fácilmente del medio de reacción para su reutilización. En este sentido, la inmovilización sobre soportes sólidos puede ser una solución aceptable, en tanto en cuanto no disminuya la actividad catalítica ni la enantioselectividad.

Siguen utilizándose en la catálisis homogénea numerosísimos complejos metálicos y organometálicos, no sólo para la síntesis asimétrica, sino también para multitud de transformaciones propias de la química orgánica. Algunos de ellos encuentran aplicación industrial masiva. Entre los ejemplos de mayor importancia se encuentra el catalizador de Ziegler-Natta, basado en mezclas de $TiCl_4/Al(CH_2CH_3)_3$, que permite llevar a cabo la oligomerización (un oligómero es un polímero formado por unos pocos monómeros) y polimerización de alquenos mediante un mecanismo diferente del de uso más común, el que recurre como intermedios de reacción a radicales. El empleo de estos catalizadores no sólo ha permitido un alto grado de control sobre la longitud de la cadena del polímero y la orientación espacial de sus sustituyentes, sino que además ha hecho posible la preparación de polímeros a partir de monómeros vinílicos (contienen el grupo vinilo, CH_2=CH–) que no polimerizan con la mediación de radicales debido a la presencia de posiciones alílicas en su estructura. Un caso de especial relevancia es el del propileno, que a pesar de ser el segundo alqueno en volumen de producción no se puede transformar en polipropileno vía radicales.

Otros catalizadores con complejos organometálicos de enorme importancia industrial son los empleados en la hidrocianuración de dienos (compuestos con dos enlaces dobles de C=C) para dar ácido adípico [$HOOC(CH_2)_4COOH$, se usa en la fabricación del nailon] y de hexametilendiamina [$NH_2(CH_2)_6NH_2$, se utiliza en la fabricación de poliamidas], así como en las hidrocarbonilaciones de alquenos para dar lugar

a aldehídos (el carbonilo es el grupo C=O). El ejemplo más característico de este último tipo de procesos es la obtención del butanal a partir del propileno en presencia de hidruro de tetracarbonilcobalto(I).

Catálisis heterogénea

Los procesos industriales en continuo comentados anteriormente requieren de una forma simple y eficaz de separación del catalizador que permita su recuperación y reutilización. Ello se consigue fácilmente si el catalizador se encuentra en una fase diferente de la de los sustratos y productos de reacción.

Generalmente, el valor del catalizador es mucho más elevado que el de los productos, no sólo por el contenido en elementos metálicos que pueda llevar, sino sobre todo por su valor añadido en investigación y desarrollo. Por consiguiente, para que el proceso llegue a ser rentable se necesita que cada centro activo del catalizador sea capaz de efectuar numerosísimas transformaciones de sustratos en productos (*turnovers*) antes de perder su actividad. Además, en el caso de los catalizadores homogeneos, habría que disponer el vertido masivo de grandes cantidades de catalizadores industriales, lo que agravaría los problemas medioambientales.

Esta necesidad de recuperar el catalizador es especialmente exigente en la industria petroquímica, donde se llevan a cabo los procesos industriales a mayor escala, y donde los productos cuentan con menor valor añadido. En estos procesos petroquímicos, el volumen de producción tan elevado y el precio ajustado de los productos se deben en gran medida a la actividad extraordinaria de los catalizadores actuales.

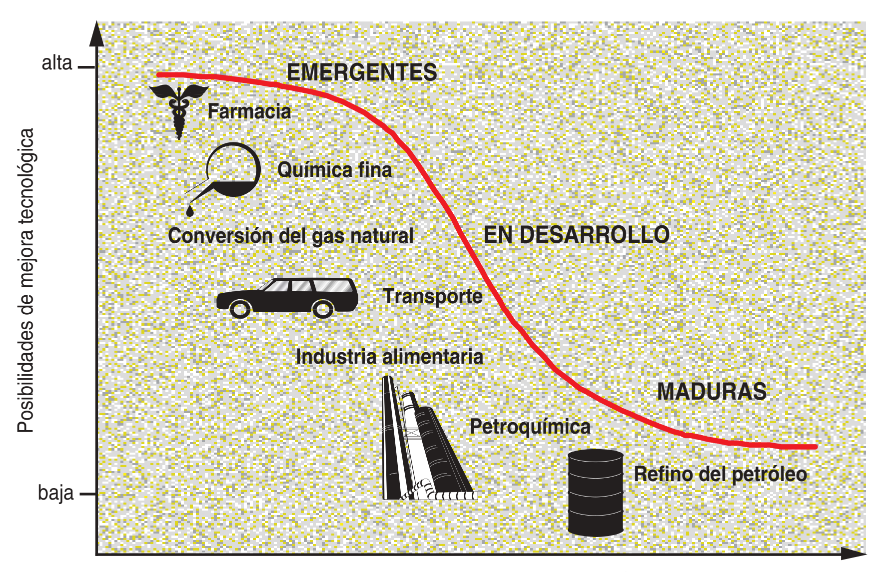
Estas razones, entre otras varias relacionadas con el diseño del reactor y la selectividad del proceso, han originado una tendencia a sustituir en la industria la catálisis homogénea por la catálisis heterogénea con sólidos. Los catalizadores sólidos o soportados por sólidos inertes son fácilmente recuperables del medio de reacción gaseoso o líquido.

Un ejemplo de este tipo de catalizadores son ciertas arcillas y sílices-alúminas amorfas, los primeros ácidos sólidos en emplearse en procesos de craqueo de fracciones pesadas del petróleo para la obtención de cantidades adicionales de gasolinas. La destilación directa del crudo proporciona una cantidad de gasolina y diesel insuficiente para cubrir su demanda como combustibles de automoción. Se necesitan cantidades adicionales de este tipo de combustibles; una forma de obtener los volúmenes necesarios es mediante los procesos de craqueo, que efectúan la rotura proteolítica de las moléculas de hidrocarburos de cadena más larga presentes en las fracciones más pesadas del crudo en moléculas de hidrocarburo de menor tamaño.

Estos procesos de craqueo se llevan a cabo actualmente en fase de vapor en unos reactores: el catalizador, compuesto por partículas pequeñas, se encuentra disperso en suspensión y experimenta un movimiento constante en el seno de una corriente de los hidrocarburos vaporizados que van a sufrir la reacción (se denomina a este proceso FCC o "craqueo catalítico fluido"). Se cree que este mecanismo implica la protonación de enlaces simples C–C y C–H y, por tanto, requiere el empleo de catalizadores ácidos (que ceden protones). Surge un problema en el transcurso del proceso: la desactivación progresiva del catalizador por formación y depósito de residuos con un alto contenido en carbono —denominados genéricamente *coque* y formados por mezclas complejas de hidrocarburos aromáticos policíclicos condensados, del tipo del antraceno, fenantreno y pireno— fuertemente adsorbidos en los centros ácidos, con la consiguiente desactivación de éstos.

A fin de mejorar la eficacia del proceso se requieren, pues, catalizadores que no sólo tengan la fuerza ácida necesaria sino que, además, permitan su constante reactivación y regeneración sin merma de su actividad. En este sentido, la utilización de zeolitas ha supuesto uno de los avances significativos en el campo de la catálisis heterogénea. Su irrupción y aplicación en la segunda mitad de este siglo como ácidos sólidos han originado una industria de muchos miles de millones de euros; paulatinamente, han reemplazado por completo a los ácidos líquidos convencionales en muchos procesos industriales.

Un ejemplo reciente de un catalizador heterogéneo que sirve para craquear alcanos es la zeolita ITQ-21 (ITQ: siglas del Instituto de Tecnología Química, Valencia; *véase la figura 1*), que constituye un ejemplo único de zeolita tridireccional de poro grande; define una supercavidad con seis aberturas y mejora la eficacia del craqueo catalítico en la producción de propileno con respecto a los catalizado-



3. TECNICAS CATALITICAS: su grado de madurez y margen para evolucionar.

A. CORMA Y H. GARCIA

Los autores

HERMENEGILDO GARCIA GOMEZ es catedrático de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y miembro del Instituto de Tecnología Química, centro mixto de la UPV y del CSIC. Sus intereses en la investigación se centran en la catálisis heterogénea y los nanomateriales. AVELINO CORMA CANOS, profesor de Investigación del CSIC, dirige el Instituto de Tecnología Química. Trabaja en las zeolitas en cuanto catalizadores.

res actualmente utilizados, basados en otra zeolita, la HY.

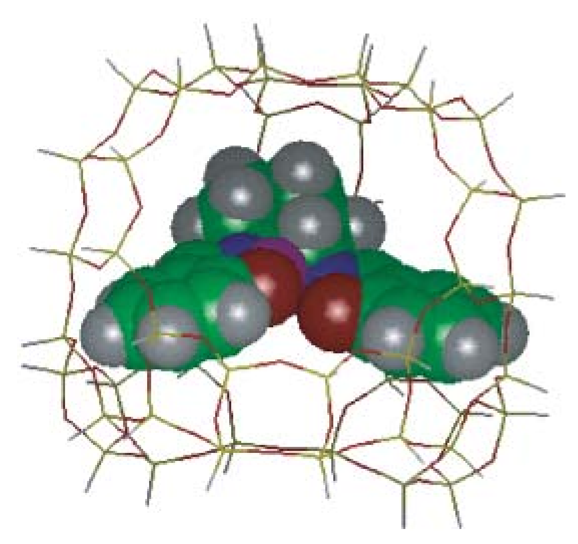
Zeolitas

Las zeolitas son silicatos alumínicos cristalinos de composición variable, cuya estructura forma tetraedros TO_4 (T vale por Si o Al) que comparten los átomos de oxígeno situados en los vértices. La distribución de estos tetraedros en el espacio da lugar a la formación de canales y cavidades perfectamente regulares de dimensiones moleculares, los microporos. A estos vacíos interiores o microporos pueden acceder las moléculas de los sustratos siempre que su tamaño molecular sea inferior al diámetro de las aberturas de las zeolitas. La superficie interna de éstas, como consecuencia de su porosidad, supera en un orden de magnitud a la superficie externa de las partículas. Es en estos espacios interiores donde tiene lugar sobre todo el proceso catalítico.

Una de las clasificaciones más extendidas de las zeolitas se basa en las dimensiones de los microporos. Así, las zeolitas se denominan de poro pequeño, medio o grande cuando las mínimas aberturas de sus poros están definidas por anillos de 8, 10 y 12 átomos de oxígeno, respectivamente. En el caso de las zeolitas de poro pequeño, sólo pueden acceder a su interior moléculas di– y triatómicas, como el N_2, O_2 y H_2O. En contraste, el número de moléculas que pueden adsorberse en los microporos de las zeolitas de poro grande es comparativamente muchísimo mayor, puesto que el diámetro de los poros está en torno a los 0,75 nm.

Se conocen zeolitas naturales o minerales desde el siglo XVIII, pero hasta 1948 no describiría R. M. Barrer la primera síntesis de estos materiales. Utilizó temperatura y presión elevadas en un intento por emular las condiciones en las que se creía se habían formado en la naturaleza. Posteriormente, R. M. Milton y D. W. Breck, trabajando para la Mobil, iniciaron en los años cincuenta los estudios dirigidos a su síntesis sistemática; lo lograron para las zeolitas A, X e Y. Los resultados obtenidos permitieron que desde 1960 la Mobil introdujera zeolitas sintéticas modificadas como catalizadores de craqueo catalítico en sustitución de las sílices/alúminas amorfas.

La estabilidad térmica de las zeolitas es tan notable, que la mayoría pueden calentarse a temperaturas elevadas (más de 1000 ºC) sin que se destruya la estructura microporosa. Esta estabilidad posibilita que se las someta a numerosos ciclos de recuperación/reactivación de sus propiedades catalíticas (estos ciclos consiguen la combustión, a temperaturas elevadas, de la materia orgánica responsable del progresivo envenenamiento que sufren los centros activos durante el curso del proceso catalítico).



4. VISUALIZACION de los cálculos de modelización molecular a nivel semiempírico de cómo el complejo Mn[bis(salicilidenimino)ciclohexano] se encuentra encapsulado en el interior de las supercajas de la zeolita Y. Este sistema ha sido efectivo para llevar a cabo la epoxidación enantioselectiva de alquenos.

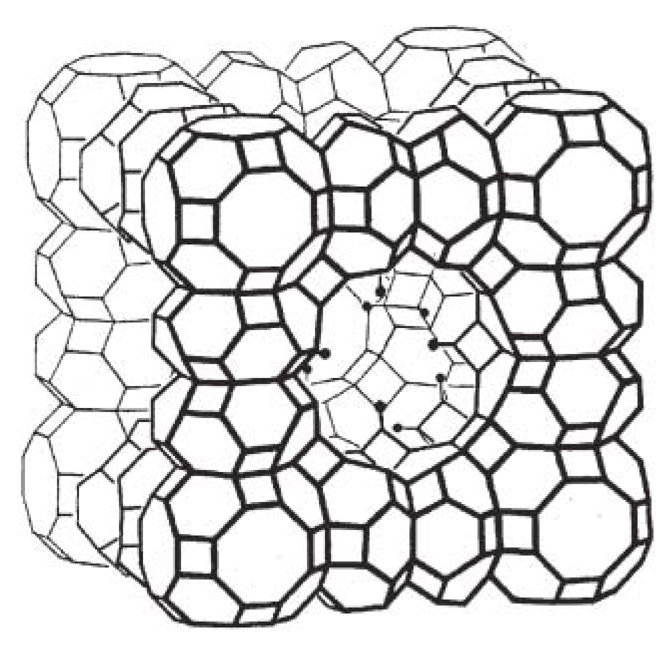
A. CORMA Y H. GARCIA

Con las zeolitas la reacción tiene lugar en el interior de un espacio restringido (la "*cavidad de reacción*"); esta característica vale para inducir una "selectividad de forma": cuando se efectúa la catálisis con otros materiales se forman dos o más productos; cuando el mismo proceso se lleva a cabo en los espacios interiores de una zeolita cuyas dimensiones de microporo se ciñan al tamaño molecular de los sustratos, de los productos o de ambos, se obtiene únicamente uno de ellos. La razón de esta selectividad reside exclusivamente en la forma y tamaño molecular del producto o productos formados y no en que sus estabilidades o camino de formación difieran. Entre todos los productos posibles, sólo se formará el que pueda caber y difundirse por el interior de los canales y cavidades del catalizador.

El ejemplo más estudiado de selectividad de forma es la obtención exclusiva del *p*-xileno (el isómero *para* del xileno, compuesto donde dos radicales metilo, CH_3^-, sustituyen a dos hidrógenos del benceno) por medio de la alquilación del tolueno (introducción de un grupo alquilo, un radical C_nH_{2n+1}, el metilo en este caso) con la zeolita ZSM-5 como catalizador. En este caso, el resultado de la alquilación bajo catálisis homogénea es una mezcla termodinámica de los isómeros *orto*, *meta* y *para* del xileno, cuya difícil separación, dada la similitud de sus puntos de ebullición, complica enormemente el proceso. (Dos moléculas son isómeras cuando tienen los mismos átomos, pero distintas propiedades.) Sin embargo, cuando la misma reacción de metilación del tolueno se lleva a cabo utilizando la zeolita ZSM-5 como catalizador, se obtiene únicamente el isómero *para*, que es precisamente el de mayor valor industrial. El motivo de esta selectividad estriba "simplemente" en que el menor tamaño molecular del isómero *para* hace que su coeficiente de difusión en el interior de los canales de la ZSM-5 sea varios órdenes de magnitud superior que los de los isó-

meros *orto* y *meta,* de dimensiones superiores a las de los microporos de la ZSM-5. Incluso las cantidades menores de estos isómeros que presumiblemente pudieran formarse en el interior de los poros del catalizador sufrirían, en las condiciones en las que se produce la reacción, una isomerización: se convertirían en el isómero *para* mucho más rápidamente de lo que se podrían difundir al exterior. Como resultado, nunca se observan los isómeros *orto* y *meta* cuando se emplea la ZSM-5 como catalizador.

Las ventajas de las zeolitas en cuanto ácidos sólidos han originado una intensa investigación encaminada a que reemplacen en los procesos industriales a los ácidos ordinarios, como el oleum y el tricloruro de aluminio. El motivo fundamental para esta sustitución no es tan sólo la mejora en la conversión y selectividad del proceso, sino además la disminución de los vertidos que se producen en la neutralización de los ácidos —necesaria para su separación de la mezcla de reacción— y la reducción al mínimo posible del volumen de subproductos ("química verde"). Dada la superior selectividad que estos catalizadores heterogéneos llegan a exhibir con respecto a los ácidos ordinarios, no cuesta anticipar que el uso de zeolitas modificadas acabará siendo general también en procesos de síntesis a menor escala (química fina y productos farmacéuticos); en esta línea, se investiga la aplicación de zeolitas ácidas en reacciones generales de química orgánica.



5. EL GALOFOSFATO CLOVERITA es un zeotipo tridireccional de poro extragrande. Su estructura se compone de supercavidades interconectadas por aberturas definidas por una secuencia de 20 átomos de oxígeno. El nombre de este material deriva de la similitud de las aberturas con una hoja de trébol. Compárense sus unidades estructurales con la del ITQ-21, en la figura 1.

M. ESTERMANN, *et al.*, *Nature* 352 (1991)

Durante la etapa de síntesis de las zeolitas, se pueden introducir otros elementos, aparte del silicio o del aluminio, en determinadas posiciones de la estructura cristalina. De estos materiales, los que cuentan con aplicaciones de más calado son las zeolitas con titanio en la red; la primera que se sintetizó, y todavía la de mayor importancia práctica, es la titaniosilicalita TS-1. Los átomos de titanio de la red de la silicalita (con una estructura idéntica a la de la ZSM-5, pero sin contener aluminio) actúan como centros catalíticos en reacciones de oxidación con peróxido de hidrógeno. Dejando aparte las reacciones de epoxidación de alquenos, el proceso industrial más importante que emplea actualmente la TS-1 como catalizador es la hidroxilación del benceno para obtener fenol. El fenol es un producto industrial clave en la fabricación de Nylon 6, resinas epoxi, policarbonatos y multitud de productos empleados como intermediarios de síntesis de plaguicidas o productos farmacéuticos, entre los que destaca el ácido acetilsalicílico.

Aunque la TS-1 ha supuesto un avance significativo en el campo de las oxidaciones catalíticas, tiene la limitación de que su tamaño de poro no permite el acceso a sustratos más voluminosos que el benceno o bencenos mono– y *para*– sustituidos. Tampoco actúa cuando se utilizan otros hidroperóxidos orgánicos (compuestos que contienen un grupo –O–O–H), dado que su tamaño supera al del H_2O_2. Por ello, se ha desarrollado una intensa investigación encaminada a obtener zeolitas de poro grande con átomos de Ti en la red (la TS-1 es una zeolita de poro medio) que pudieran servir de catalizadores de oxidación para sustratos más voluminosos. Entre estos materiales destaca la Ti-Beta, que aunque posee centros con una actividad intrínseca inferior a los de la TS-1, es más eficaz que esta última, gracias a su mayor tamaño de poro, como catalizador en la epoxidación del ciclohexeno y de los alquenos ramificados.

Aluminosilicatos mesoporosos

A pesar del avance significativo que ha supuesto la introducción de zeolitas como catalizadores heterogéneos en procesos industriales, desde el principio quedó claro que sería deseable contar con una serie de materiales porosos donde el diámetro de los canales pasase de los 0,75 nm de las zeolitas de poro grande. Además, sería muy conveniente que el diámetro de poro se pudiera controlar durante la síntesis del aluminosilicato.

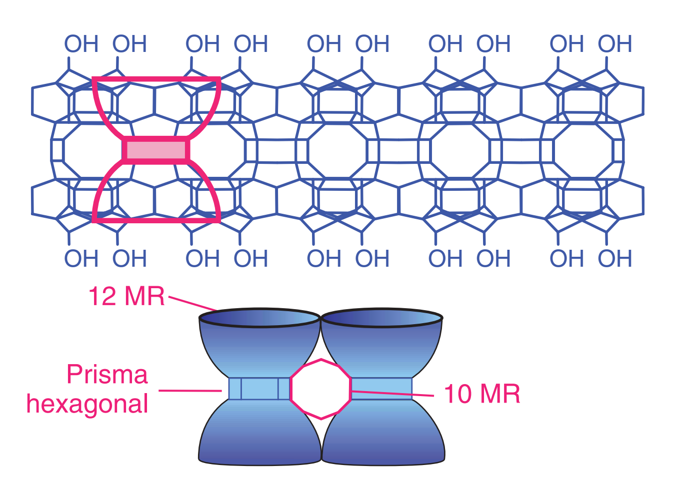
La búsqueda de este tipo de materiales fue muy intensa en la segunda mitad de los años ochenta; un logro parcial ha sido la preparación de aluminofosfatos de poro extragrande (las aberturas de los poros son anillos con más de doce átomos de oxígeno), entre los que destaca el galofosfato cloverita. Sin embargo, la escasa estabilidad de estos materiales, comparada con la de los aluminosilicatos, y la dificultad de introducir centros que puedan actuar como sitios activos en la catálisis han impedido su aplicación real.

En este contexto, la síntesis en 1991 por parte de investigadores de la Mobil de aluminosilicatos mesoporosos (MCM) supuso una contribución de extraordinaria im-

portancia. De entre ellos, el más empleado es el MCM-41; lo forman unos canales hexagonales paralelos cuyo diámetro puede variarse durante la síntesis entre 2 y 10 nm. De acuerdo con la convención de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), el límite para clasificar como micro– o mesoporoso a un material es que el diámetro de sus canales sea inferior o no a los 2 nm. Por lo tanto, las zeolitas son sólidos microporosos, mientras la MCM-41 sería un material mesoporoso.

La limitación más importante que dificulta la aplicación generalizada del aluminosilicato MCM-41 en catálisis es la menor estabilidad hidrotermal de este tipo de materiales, comparada con la de las zeolitas ordinarias. Incluso el simple almacenamiento en la atmósfera con una cierta humedad ambiente provoca con el tiempo una sensible merma de la mesoporosidad del material.

Un material reciente que combina las ventajas de las zeolitas —su extremada estabilidad térmica y química— junto con las de los aluminosilicatos mesoporosos —una superficie accesible muy grande— son los aluminosilicatos cristalinos deslaminados que se obtienen a partir de precursores laminares de ciertas zeolitas. El primero que se ha descrito es la ITQ-2. Este nuevo tipo de materiales tiene cierta similitud estructural con las arcillas laminares, pero se diferencia de ellas por el grado de deslaminación tan alto, gracias al cual, y a diferencia de las arcillas, gran parte del espacio interlamelar resulta accesible a sustancias apolares. (Aunque las arcillas están formadas por láminas, la atracción coulombica tan fuerte entre ellas impide que las moléculas apolares accedan a las galerías entre las láminas.) La superficie total accesible es superior a los 700 $m^2 \times g^{-1}$, similar a la de un material mesoporoso tipo MCM-41, con la ventaja añadida de que las paredes son cristalinas y, por consiguiente, más robustas.



6. ESQUEMA de una lámina del material ITQ-2 donde se indican las dimensiones y se muestra que la superficie exterior está formada por "copas" abiertas al exterior.

A. CORMA, *et. al.*, *Nature* 396 (1998)

La obtención de estas nuevas zeolitas deslaminadas ha sido posible merced al conocimiento detallado de las diferentes etapas por las que transcurre la síntesis de la estructura de las zeolitas. Así, la difracción de rayos X establece que durante la síntesis de la zeolita MCM-22 se atraviesa una etapa previa en la que el sólido precursor está compuesto por capas cristalinas de pequeño espesor, que luego, durante la descomposición del compuesto orgánico empleado como agente director de la estructura, se fusionan a lo largo del eje Z del material. Esta condensación final da lugar a la zeolita MCM-22. Pero si en la etapa anterior a su colapso se procede a desordenar y separar las capas del sólido laminar precursor, se producirá la deslaminación, y la fusión posterior de todas las capas en una sola estructura ya no será posible; resulta de esta manera un nuevo material, la ITQ-2. Es fácil anticipar que este tipo de sólidos deslaminados, que combina las ventajas de las zeolitas y de la MCM-41 y supera así las limitaciones de ambos materiales, va a tener una rápida aplicación en la catálisis heterogénea.

"Impresión molecular"

Según hemos comentado más arriba, las enzimas actúan como verdaderos catalizadores al disminuir la energía de activación de un proceso. La extraordinaria actividad de la enzima deriva de que el centro catalítico se adecua perfectamente a la geometría y polaridad del estado de transición de una reacción. Debería, pues, ser posible la preparación de moléculas orgánicas de tamaño, forma y características similares a las del estado de transición de una reacción e "imprimir" sus propiedades en una matriz (un gel de sílice o un polímero). La eliminación posterior de estas moléculas por combustión o extracción dejaría en la matriz huecos con formas semejantes al estado de transición de la reacción, con lo que se habría obtenido un centro catalítico que se caracterizaría por su reconocimiento molecular del complejo activado. De esta forma se emula el concepto de llave-cerradura, clave de la actividad de las enzimas pero sobre un material abiótico (análogo a lo mostrado en el esquema 2).

Se ha dado un paso adicional con el desarrollo de anticuerpos catalíticos. Unos compuestos que mimetizan el estado de transición de una reacción se inyectan en seres vivos, que enseguida generan anticuerpos que se adaptan específicamente a esos compuestos. Se extraen los anticuerpos y se los prueba hasta encontrar los correspondientes a la molécula inyectada; podrán entonces utilizarse como anticuerpos catalíticos para la reacción objetivo.

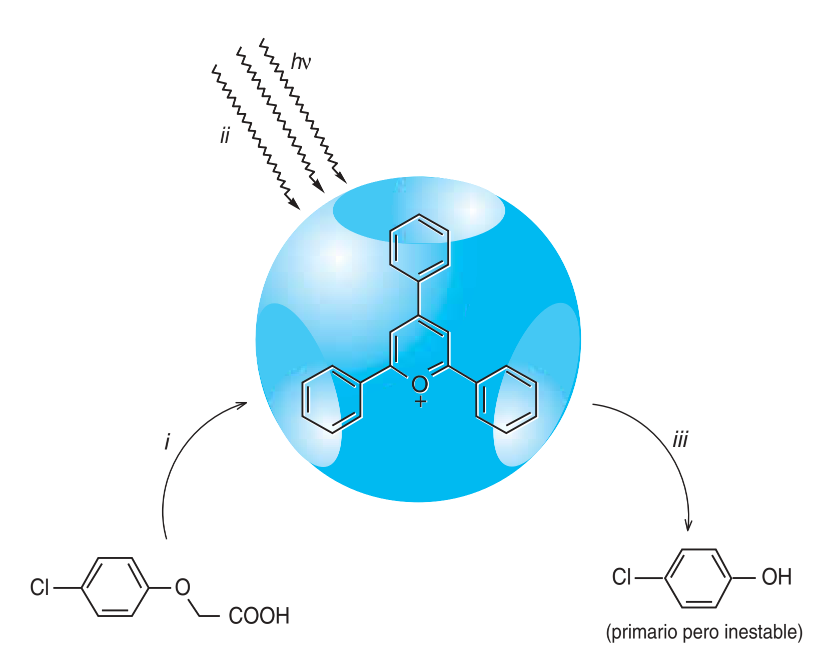
Nuevos campos para la catálisis

Una de las líneas de más reciente aparición en el área de catálisis va encaminada a la reducción de emisiones contaminantes. Se ha propuesto que los catalizadores de los tubos de escape lleven componentes con cobre y otros metales que produzcan la descomposición catalítica de los óxidos de nitrógeno formados en la combustión, a fin de evitar su emisión. Además, existen otros procesos químicos, como los de la obtención de ácido nítrico y la industria de fertilizantes, donde se emiten cantidades eleva-

das de NO_x; también en esos casos hay que disponer de catalizadores de descomposición en las chimeneas. Se han ensayado con éxito nuevos catalizadores basados en zeolitas que contienen Cu, Co y catalizadores de Pd; deberían colocarse en aquellos puntos donde se emita el NO_x. Sin embargo, deben solucionarse todavía algunos problemas técnicos relacionados con la estabilidad de estos catalizadores cuando están en presencia de SO_x y de H_2O.

Por razones medioambientales, ya no es posible el empleo de oxidantes que contengan los metales de transición (Mn, Cr) que llevan los oxidantes clásicos, como el permanganato y el dicromato. El oxidante ideal es el oxígeno, pero hasta ahora los resultados logrados en la mayoría de las reacciones de oxidación que emplean directamente O_2 como reactivo no posibilitan la aplicación a escala real en todos los procesos. Una alternativa económicamente rentable, que al mismo tiempo respeta el medio ambiente, consiste en el empleo de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como oxidante. En este caso el único subproducto es el agua. Procesos relacionados con ése emplean como agentes oxidantes hidroperóxidos orgánicos, por ejemplo el hidroperóxido de terbutilo o el de cumilo. Estos hidroperóxidos, a diferencia del H_2O_2, presentan la ventaja de ser solubles en una amplia variedad de disolventes orgánicos. Para llevar a cabo estas oxidaciones se ha desarrollado una serie de catalizadores heterogéneos; destaca, por la novedad que representó su introducción, la ya citada titaniosilicalita TS-1.

Un área emergente en pleno desarrollo y de aplicación inmediata en la descontaminación, tanto gaseosa como de vertidos acuosos, es la fotocatálisis. Un fotosensibilizador absorbe la luz y la convierte en energía química mediante la generación de una especie química muy agresiva. La energía de un mol de fotones azules es de 82 kilocalorías; bien aplicada es más que suficiente para romper directamente un gran número de enlaces covalentes. A modo de ejemplo, la energía de un enlace simple C–C en los alcanos ronda las 80 kilocalorías por mol.



7. FORMA DE ACTUACION DE UN FOTOCATALIZADOR heterogéneo. El compuesto fotoquímicamente activo es el catión 2,4,6-trifenilpirilio que se encuentra encapsulado en el interior de los microporos de la zeolita Y. El sustrato que va a sufrir degradación es adsorbido en el material microporoso (proceso i) y sufre degradación cuando el fotosensibilizador absorbe la energía luminosa (proceso ii), dando lugar al producto que se desorbe (proceso iii).

A. SANJUAN, *et. al.*, *Appl. Catalysis* B15 (1998)

La estabilidad y robustez de los sensibilizadores más generales son extremas; no se autodegradan. Se trata de ordinario de compuestos semiconductores con una diferencia de energía entre la banda de conducción y la de valencia superior a 3 electronvolt. Posee un gran número de aplicaciones patentadas el TiO_2 en su fase anatasa (de cristalización tetragonal). El TiO_2 es el pigmento más usado en la preparación de pinturas blancas. Una aplicación curiosa de la fotocatálisis es la incorporación de anatasa en el esmalte de baldosas cerámicas con el fin de evitar que se les acumulen grasas. Se ha demostrado que la simple luz ambiental de los tubos fluorescentes basta para degradar la materia orgánica que se deposite en ellas. En un hospital, con esta cerámica que se limpia por sí misma, la simple iluminación produciría la desinfección de las paredes. Incluso se han llevado a cabo experiencias piloto para luchar contra la suciedad urbana, producida por los aceites lubricantes y emisión de restos de combustible de los vehículos, pintando con TiO_2 los postes de iluminación e incluso el asfalto de las calles. Por último, esta área de fotocatálisis también ha proporcionado resultados espectaculares en el tratamiento de las aguas residuales industriales con un alto contenido en materia orgánica no biodegradable. Estos contaminantes resisten otros tratamientos de depuración, pero se degradan cuando se los irradia en presencia de un fotosensibilizador.

Bibliografía complementaria

OXIDATION REACTIONS WITH IN SITU GENERATED OXIDANTS. M. G. Clerici y P. Ingallina en *Catal. Today* n.º 41, págs. 351-364, 1998.

A LARGE-CAVITY ZEOLITE WITH WIDE PORE WINDOWS AND POTENTIAL AS AN OIL REFINING CATALYST. A. Corma, M. J. Díaz-Cabañas, J. Martínez-Triguero, F. Rey y J. Rius en *Nature* n.º 418, págs. 514-517, 1 de agosto de 2002.

LEWIS ACIDS AS CATALYSTS IN OXIDATION REACTIONS: FROM HOMOGENEOUS TO HETEROGENEOUS SYSTEMS. A. Corma y H. García en *Chemical Reviews* n.º 102, págs. 3837-3892, 2002.

Caos en la escala cuántica

Simulaciones de billares de escala atómica revelan fenómenos caóticos que permiten nuevos avances teóricos y aplicados, especialmente en nanotecnología

Mason A. Porter y Richard L. Liboff

Durante el siglo XX, dos nuevas líneas del estudio de los sistemas físicos arruinaron las esperanzas de predecir exhaustivamente la naturaleza. La primera, la teoría de la mecánica cuántica, descubrió una incertidumbre que impera en las escalas más pequeñas de la materia —en el ejemplo por excelencia, la posición y el momento de un electrón no pueden conocerse simultáneamente y con total precisión en un instante determinado—. La otra es lo que ahora llamamos teoría del caos. Algunos fenómenos dependen hasta tal punto de las condiciones iniciales del sistema, que un cambio imperceptible en el valor inicial de una variable puede volver impredecible el resultado de un proceso. El caos aparece en situaciones muy dispares, en la frecuencia de goteo de un grifo, digamos, o en el movimiento de los planetas.

Dado que lo impredecible resulta consustancial tanto a la teoría del caos como a la mecánica cuántica, es natural preguntarse qué sucede cuando estos fenómenos se combinan. ¿Caos absoluto, quizá? Probablemente no; tenemos incluso los medios para elaborar modelos del *caos cuántico,* o comportamiento caótico a escala cuántica. Los primeros intentos de entender ese reino singular han producido resultados matemática y científicamente importantes. Habiéndose encontrado caos en cualquier escala, no puede descartarse que nos topemos también con él en los dispositivos de dimensiones nanométricas, con la incertidumbre añadida, además, propia del mundo cuántico.

La búsqueda de indicios de una confluencia de la mecánica cuántica y el caos comenzó ya a finales del siglo XIX, cuando el matemático, físico y filósofo francés Henri Poincaré abordó las ecuaciones que habían de predecir las posiciones de los planetas en su movimiento de rotación alrededor del Sol. La tarea parecía en principio bastante fácil: se anotan las posiciones y velocidades iniciales, se resuelve con ellas un conjunto de ecuaciones basadas en las leyes de Newton del movimiento y los resultados predirán las posiciones futuras. Pero Poincaré derribó sus propias expectativas. Aun teniendo en cuenta las ecuaciones de movimiento de sólo dos planetas, unas mínimas diferencias en las condiciones iniciales —los valores iniciales de la posición y la velocidad— producían cambios notables en las posiciones futuras. Poincaré no usó la palabra "caótico", pero así es como se llama a un sistema de esa naturaleza hoy en día.

El significado profundo del trabajo de Poincaré se reconocería mucho más tarde, en la década de 1960, cuando el meteorólogo Edward Lorenz encontró comportamiento caótico en un conjunto sencillo de ecuaciones con el que estudiaba ciertas condiciones atmosféricas. Surgieron sistemas caóticos allá donde se mirase. Había caos en las órbitas galácticas y casi en cualquier tipo de oscilador, se tratara de unos muelles o de unos circuitos eléctricos.

Se ha encontrado comportamiento caótico también incluso en el mundo microscópico; los científicos todavía se preguntan cómo puede estudiarse

Los autores

MASON A. PORTER realiza desde 2002 sus trabajos posdoctorales en el Instituto de Tecnología de Georgia. Obtuvo una licenciatura en ciencias (matemática aplicada) en el Instituto de Tecnología de California en 1998 y se doctoró en la Universidad de Cornell. RICHARD L. LIBOFF ha sido profesor de ingeniería eléctrica, física aplicada y matemática aplicada en la Universidad de Cornell durante más de tres décadas; dirigió la tesis de Porter. Es autor de numerosos libros de texto.



1. LOS NANOTUBOS DE CARBONO, como muchos otros dispositivos del nanomundo, exhiben características caóticas a escala cuántica. Los modelos de fenómenos caóticos a escalas cuánticas han descubierto la aparición de caos en diversos sistemas nanotécnicos: los puntos cuánticos, los dispositivos superconductores de interferencia cuántica y los nanotubos de carbono alineados que se muestran en esta foto.

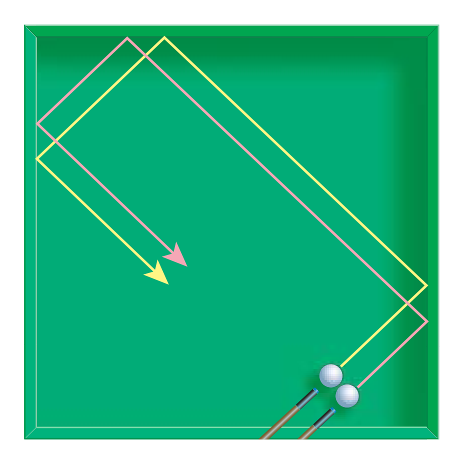
MICROFOTOGRAFIA CORTESIA DE LA ORGANIZACION AUSTRALIANA DE INVESTIGACIONES INDUSTRIALES Y CIENTIFICAS DE LA COMMONWEALTH

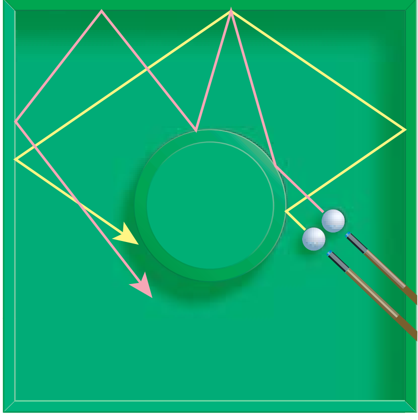
con más provecho el caos en el mundo cuántico. ¿Muestran características caóticas los sucesos que ocurren en el interior de átomos y moléculas? Mediante simulaciones matemáticas, hemos tomado una idea de caos que se predica de mundos enteros y hemos empequeñecido su objeto para que encaje en el reino cuántico de los átomos y los electrones. En algunos casos, el caos no aparece nunca. En otros, esas escalas minúsculas se manifiestan caóticas. Hay situaciones donde el caos crea más o menos desorden según las circunstancias. A partir de estos trabajos se están desarrollando nuevas teorías matemáticas y físicas. Se puede recurrir a ellas en una variedad de aplicaciones: puntos cuánticos, nanotubos, dispositivos superconductores de interferencia cuántica.

Una partida idealizada de billar

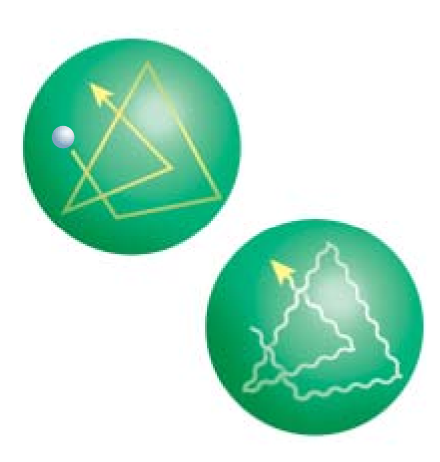
Los sistemas que pueden presentar comportamiento caótico (una clase compleja dentro de los llamados sistemas dinámicos) desafían a menudo un entendimiento intuitivo. Por tanto, para comenzar a estudiarlos se usan ejemplos muy simples, como el de una partícula en una caja. Una bola de billar que se mueve en una mesa sin troneras es una versión bidimensional de este modelo. Se simplifica aún más despreciando la fricción. Esta simple analogía nos va a facilitar el camino hacia el mundo del caos cuántico.

Imaginemos una mesa ideal de billar, rectangular. Coloquemos una bola cerca de una esquina y golpeémosla hacia la banda más cercana. La bola golpea la banda, rebota con un ángulo de reflexión igual al de incidencia, atraviesa la mesa hasta que golpea otra banda y rebota de nuevo siguiendo la misma regla. Si la fricción u otra fuerza cualquiera no frena la bola, ésta continuará rebotando en la mesa para siempre. Para comparar las trayectorias de la bola cuando las condiciones iniciales varían un poco, se para la partida simulada y se coloca la bola casi en el mismo punto inicial de la partida anterior; sólo se lo desplaza una pizca. Golpeada como antes —con el mismo ángulo y con la misma fuerza—, la bola seguirá al principio un camino que apenas diferirá del de la primera partida. Pero si se dibuja el camino seguido por la bola en los dos juegos, se verá que las líneas resultantes se diferenciaban con el tiempo. Se llama a este fenómeno divergencia lineal*;* significa que la distancia que separa las dos trayectorias se incrementa en una cantidad proporcional a la cantidad de tiempo que transcurre. En conclusión, nin-





2. SE OBSERVA COMPORTAMIENTO CAOTICO en una partida idealizada de billar. En una mesa rectangular sin troneras (*izquierda*), la bola seguirá una trayectoria que dependerá de su posición inicial y de cómo se la haya golpeado. Con posiciones iniciales un poco distintas, golpes similares producirán trayectorias similares: es un caso de divergencia lineal. Si se pone en el centro de la mesa un obstáculo circular, una especie de quinta banda circular (*derecha*), se tendrá un "billar de Sinai". Un primer lanzamiento golpea la banda circular y rebota varias veces en las bandas laterales y en la central. Se desplaza de nuevo un poco la posición inicial de la bola. Esta vez, la segunda trayectoria será diferente de la primera por completo. Este ejemplo muestra una divergencia exponencial: las dos trayectorias se separan una de otra a un ritmo que crece de manera exponencial; es una característica definitoria de los fenómenos caóticos.



3. UNA PARTICULA ATRAPADA en una esfera sirve de modelo simple con que efectuar simulaciones matemáticas (*arriba*). Una partícula que rebota dentro de una esfera puede representar varios fenómenos físicos, el encierro de un electrón por ejemplo. En mecánica cuántica, las partículas exhiben algunas propiedades ondulatorias y viceversa; una simulación cuántica de una partícula en una esfera puede ejecutarse de manera equivalente con una onda confinada en la esfera (*abajo*), descrita con una ecuación de Schrödinger que representará sus propiedades cuánticas.

guna partida jugada en esta mesa se comportará caóticamente.

Añadamos ahora, en el centro de la mesa, un obstáculo fijo, circular, una quinta "banda circular". Apuntemos la bola hacia ella. Chocará contra el nuevo obstáculo, rebotará hacia una banda exterior, rodará hacia otra banda exterior, golpeará la circular de nuevo, etc. Como antes, volvamos a empezar; coloquemos la bola más o menos (pero no exactamente) en la misma posición inicial y golpeémosla de la misma manera. Muy pronto, quizás estará siguiendo una trayectoria completamente distinta de la primera; será un ejemplo de divergencia exponencial: con el tiempo, las dos trayectorias divergirán a un ritmo que irá siendo exponencialmente más rápido. Este billar, bautizado con el apellido del matemático Yakov Sinai, de la Universidad de Princeton, es caótico.

La mesa con la banda circular en medio ilustra una propiedad fundamental del caos, la dependencia sensible de las condiciones iniciales. En otras palabras, condiciones iniciales infinitesimalmente diferentes —aquí la posición inicial de la bola— producen resultados muy distintos. Lo mismo descubrió Poincaré al analizar las ecuaciones que describen el movimiento planetario. E igual ocurre en otros tipos de billares: una mesa cuya frontera exterior tenga la forma de la pista de atletismo de un estadio produce comportamiento caótico. Enseguida veremos que estos ejemplos nos ayudan a explorar cómo se manifiesta el caos en el dominio cuántico.

Seguimiento de la posición de una partícula

No cuesta seguir en los billares, con sólo unos pocos rebotes en las bandas, la trayectoria de la bola. Imaginemos un modelo de mesa de billar definido en una retícula bidimensional; para registrar la trayectoria, marquemos puntos en la retícula a intervalos de tiempo regulares. Tropezaremos con un problema: después de muchos rebotes, con la bola cruzando y recruzando su camino, y en algunos casos incluso volviendo a trazarlo, los puntos dibujados se convierten en una maraña que con frecuencia no aporta información alguna. Pero no es ésa la única manera de proceder.

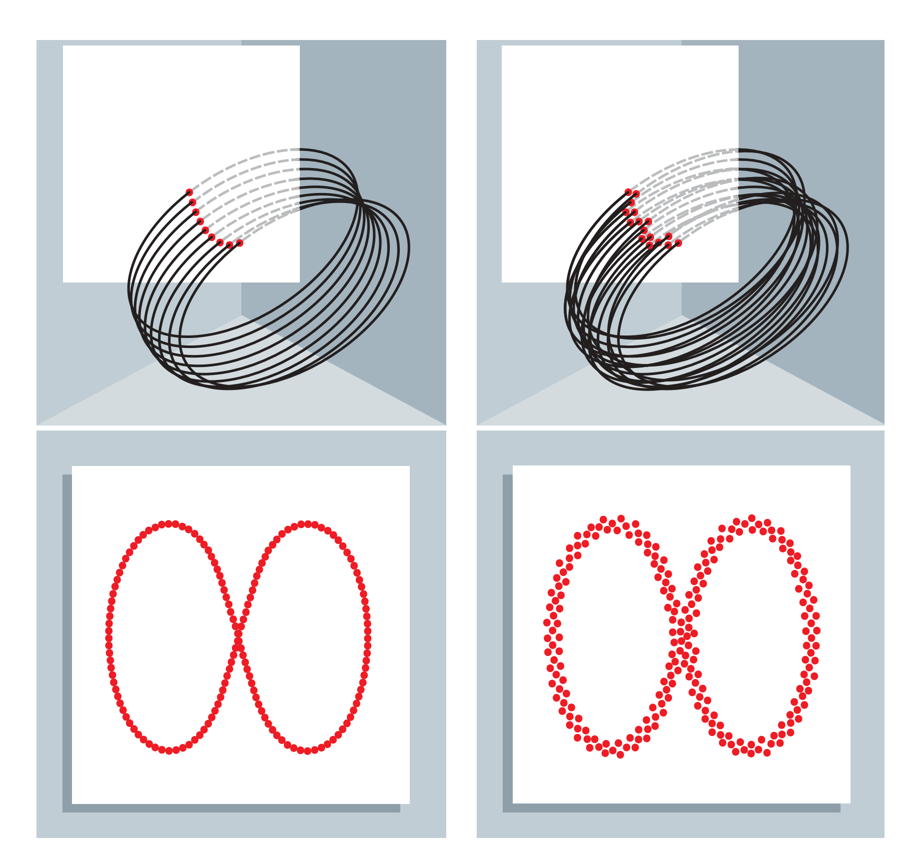
Se recurre a menudo a otra manera de representar trayectorias, inspirada por unas ideas de Isaac Newton. En el siglo XVIII era común que se emplease un péndulo para estudiar las fuerzas de la naturaleza. Newton encontró que podía describir completamente el estado de un péndulo con dos variables: su posición y su momento. Los físicos y matemáticos actuales también utilizan esas variables para describir la actividad de las partículas subatómicas. En otras palabras, el estado de una partícula puede describirse por medio de su posición y su momento. Su representación gráfica —momento frente a posición— crea un *espacio de fases*.

El espacio de fases resuelve bastantes problemas matemáticos. Vale para seguir, por ejemplo, la actividad de un electrón. Eso sí, en cuanto se quiere examinar con él una partícula del mundo real, en tres dimensiones, pone en un brete a la imaginación. El espacio de fases tiene entonces seis dimensiones: tres para el espacio —una para cada eje

de las coordenadas espaciales— y tres para el momento. Cualquiera puede generar una gráfica con sólo dos dimensiones, e incluso tres se pueden representar y entender con bastante facilidad. Pero, ¿cómo se imagina una representación en cuatro o más dimensiones?

En ocasiones, se solventan pegas así aferrándose a situaciones más simples. Los billares de que hemos estado hablando sólo permiten a la bola movimientos bidimensionales. El espacio de fases consta entonces sólo de cuatro dimensiones. Aun así, no es sencillo representar un fenómeno tetradimensional en una hoja de papel. Por suerte, un ordenador puede vérselas con cuatro dimensiones, o con muchas más. Se introducen en el ordenador los datos de posiciones y momentos para estudiar el movimiento de partículas incluso en espacios multidimensionales. El ordenador incorpora estos datos en forma de ecuaciones que tienen en cuenta todas esas dimensiones. Luego, ciertos programas seccionan esa mole multidimensional y extraen una rebanada: una sección del espacio de fases. Se la denomina *sección de Poincaré*. Proyectada sobre un espacio bidimensional, crea un conjunto de puntos que se visualizan en la pantalla del ordenador o se imprimen en una hoja de papel. El dibujo obtenido representa una serie de instantáneas del sistema que se está investigando. Gracias a esas instantáneas se percibe la relación entre condiciones y resultados; así, cada vez que se satisfaga alguna condición determinada, se puede tomar una instantánea para examinar algún aspecto del sistema.

Si un mapa de Poincaré consiste en una línea continua —no importa su curvatura—, el sistema no es caótico. Si, por el contrario, un mapa de Poincaré consta de una serie de puntos a todos los efectos aleatoria, el sistema será caótico. Así, dado cierto sistema —por ejemplo, uno de los billares de antes—, podremos describirlo mediante ecuaciones matemáticas, recopilar datos de la posición y el momento en el tiempo y generar un mapa de Poincaré. Los resultados, por lo usual fiables, permiten distinguir un comportamiento caótico de otro que no lo sea.

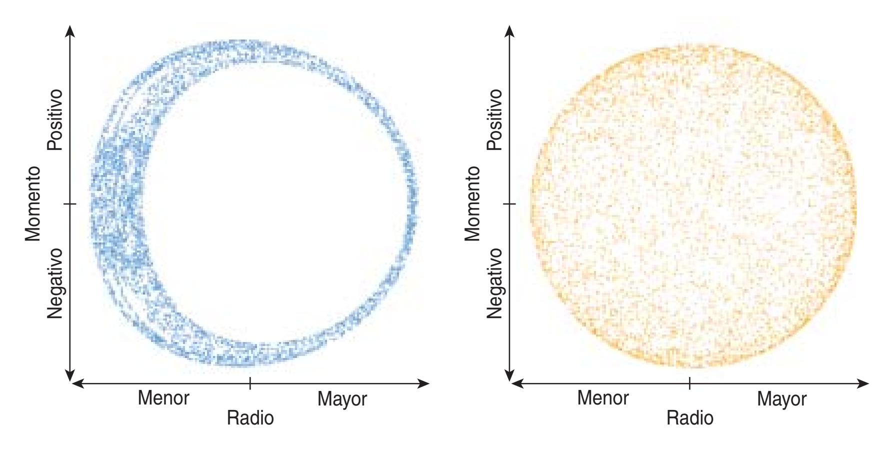


4. LAS SECCIONES DE POINCARE revelan el comportamiento caótico. Sea un electrón que rebota en el interior de una esfera, como en la figura 3, pero esta vez permítase que el radio de la esfera vibre en función del tiempo. Es decir: la partícula encerrada interacciona con la pared esférica vibratoria que la rodea. Los autores describen este sistema mediante un conjunto de ecuaciones, introducen los datos iniciales del sistema y lo dejan evolucionar. Los resultados toman la forma de una curva cerrada en el espacio (*superior izquierda*). Sólo se recopilan los datos que se ajustan a condiciones específicas, como por ejemplo que alguna variable se iguale a 0. Si los datos se toman en tres dimensiones, esa criba equivaldrá a insertar una hoja de papel para que el movimiento trace en ella una imagen bidimensional, llamada sección de Poincaré. En este caso, se proyecta sobre el plano que describe la posición y el momento del radio de la esfera. La sección de Poincaré resultante (*inferior izquierda*) contiene sólo curvas continuas, así que el sistema no es caótico. Cambiando el sistema ligeramente —por ejemplo, comenzando con una esfera con un radio apenas menor o mayor—, la simulación produciría nuevos datos (*superior derecha*). Aunque ambos conjuntos de datos (*paneles superiores*) puedan parecer virtualmente idénticos, crearán secciones de Poincaré muy distintas. En el caso ilustrado aquí, la segunda sección de Poincaré (*inferior derecha*) incluye áreas manchadas: el sistema exhibe un comportamiento caótico.

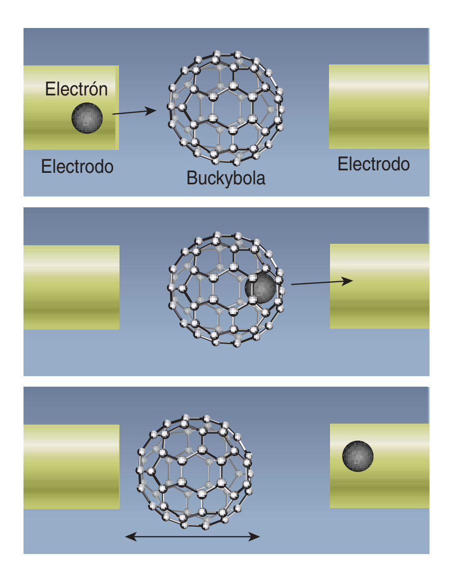
Una partícula encerrada en una caja

Con estos conceptos podemos ya explicar algunos aspectos de nuestras investigaciones del caos cuántico. Para empezar, consideremos una versión un poco más complicada de la partícula en la caja. Imaginemos una mesa de billar tridimensional con forma de esfera y supongamos que no encierra una bola de billar, sino un electrón. Este sistema es un ejemplo de *billar cuántico*. Lo estudiamos por medio de simulaciones informáticas que exhiben el movimiento del electrón a medida que colisiona con las paredes de su prisión esférica.

Dado que este sistema reside en el dominio cuántico, describiremos la partícula con una ecuación, la ecuación de Schrödinger, que sintetiza las extrañas características



5. EL CAOS PUEDE DARSE tanto en las variables clásicas como en las cuánticas de los billares cuánticos vibratorios. El gráfico generado al proyectar una sección de Poincaré sobre un plano descrito por el radio y el momento de una esfera vibratoria (*izquierda*) consiste en un anillo distorsionado de puntos. Claramente, no es una línea continua, lo que indica un comportamiento caótico. Una proyección de una sección de Poincaré que muestra las variables cuánticas de este mismo sistema (*derecha*) también exhibe caos.



6. SE ESPERA que los transistores unimoleculares exhiban caos semicuántico (la aparición de fenómenos caóticos en sistemas con componentes de ambos tipos, clásico y cuántico). Hongkun Park y sus colaboradores del Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley conectaron una molécula de carbono-60, una buckybola, a un par de electrodos de oro (*arriba*). Cuando un electrón salta del electrodo de la izquierda a la buckybola (*medio*) y luego de ésta al electrodo de la derecha, la bola rebota hacia adelante y hacia atrás (*inferior*). Se elabora un modelo de este sistema mediante procedimientos que se asemejan a los que los autores usaron para los electrones atrapados en esferas vibratorias.

de la mecánica cuántica. El principio de incertidumbre de Heisenberg establece que no se pueden determinar a la vez con toda exactitud la posición y el momento de una partícula, es decir, cuanto más preciso es el conocimiento de la posición, menos lo es el del momento. La ecuación de Schrödinger incorpora este principio.

Además, los objetos a escala cuántica exhiben características tanto de partícula como de onda (la *dualidad onda-partícula*). Las soluciones de la ecuación de Schrödinger reciben el nombre de funciones de onda; la partícula que, imaginamos, rebota en el interior de una esfera puede también conceptualizarse como una onda que se refleja en el interior de ese mismo espacio esférico. En vez de añadir otra ecuación para representar la esfera, se define la ecuación de Schrödinger de modo que haga desaparecer una onda en la nada cuando alcanza la frontera de la esfera. Describimos la situación entera —una partícula, u onda, en una esfera— con sólo una ecuación de Schrödinger.

Las ondas son elementos cruciales para entender los fenómenos que se desarrollan dentro de la esfera. Muchas ondas ordinarias —las olas del mar o las vibraciones de una cuerda de guitarra— consisten en una suma de ondas de diversas frecuencias. Se llama *modo normal* a una onda compuesta de una sola frecuencia, una onda mucho más simple. Escojamos una onda así, de una frecuencia apropiada, e introduzcámosla en la ecuación de Schrödinger; los resultados nos enseñarán cómo rebotaría esa onda dentro de la esfera. A continuación puede considerarse qué sucedería en presencia de múltiples modos normales.

En los ejemplos de los billares, buscamos el caos variando un poco la posición inicial de una bola y siguiendo luego su trayectoria. Aquí, en lugar de cambiar la posición inicial, se añade un segundo modo normal con una frecuencia diferente. Para obtener la solución completa de la ecuación de Schrödinger, habríamos de incluir una serie infinita de modos normales, cada uno caracterizado por su energía y su geometría. Sin embargo, a fin de que la simulación se complique lo menos posible, se introducen sólo dos modos en la función de onda. De esa manera se llega a una ecuación de la que se sabe que nunca produce caos. Se concluye así que no hay comportamiento caótico en una partícula que se mueve dentro de una esfera estacionaria. Se puede comparar este sistema a uno de los billares mencionados antes: en la analogía, el comportamiento regular de las funciones de onda haría las veces de la divergencia lineal que se observaba entre las trayectorias cercanas en una esfera de billar clásica. Con este ejemplo no hemos dado todavía con un modelo de un sistema cuántico caótico.

Se añaden más rebotes al billar

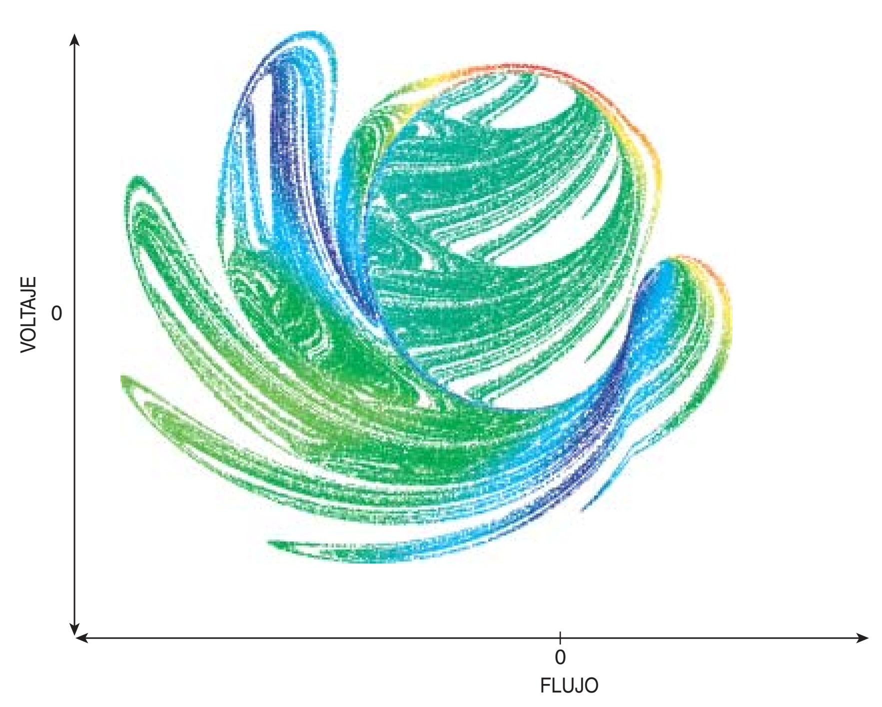
Compliquemos un poco el ejemplo anterior: la frontera de la esfera vibra hacia adentro y hacia afuera. Cuando una partícula golpea esta pared vibratoria, el resultado depende tanto del estado de la pared como del estado de la partícula. Este caso lleva un poco más de trabajo, pero es una dificultad necesaria si queremos simular el caos cuántico. (En este caso, simulamos lo que se conoce como *caos semicuántico,* por razones que se aclararán más tarde.)

Para simular este sistema se empieza exactamente como en el caso de la partícula en una esfera esta-

cionaria: se plantea una ecuación de Schrödinger para la partícula. Pero esta vez debe haber también una ecuación para la vibración de la frontera; en esta simulación la actividad de la partícula depende de sus propiedades y de las de la pared. Puede atribuirse un movimiento mecánico a la pared, esto es, se puede describirla con una ecuación clásica (en vez de con una cuántica). En otras palabras, este ejemplo de la partícula en la esfera vibrante nos lleva a la frontera entre los mundos clásico y cuántico. Afortunadamente, una cantidad, el *hamiltoniano,* codifica el comportamiento dinámico combinando la ecuación de Schrödinger de la partícula y la ecuación mecánica de la pared. El hamiltoniano desempeña el papel de la energía conservada y produce las ecuaciones diferenciales ordinarias necesarias para esta simulación.

Como antes, podemos atacar las ecuaciones insertándoles dos modos normales. En nuestra investigación, simulamos por ordenador las ecuaciones diferenciales obtenidas del hamiltoniano para examinar el comportamiento de este billar. Después de cada cálculo, cambiamos un poco las condiciones iniciales, por ejemplo dándole un valor inicial diferente al radio, cambiante con el tiempo, de la esfera. Los datos de cada caso se representaron en forma de sección de Poincaré. En estas simulaciones, que describían el comportamiento tanto de la pared de la esfera como de la partícula encerrada, examinamos los mapas de Poincaré para cada componente del sistema.

Las simulaciones matemáticas revelaron caos en diversas formas. Por ejemplo, algunos mapas de Poincaré de las variables clásicas —el radio del muro y su momento— consistían en un anillo disperso de puntos; la ausencia de una línea continua indicaba que existían fenómenos caóticos. Otros mapas de Poincaré mostraron formas de caos más ordenadas en las variables clásicas. En otras palabras: algunos de los mapas de Poincaré resultantes de estas simulaciones incluían áreas más estructuradas: líneas que no eran demasiado continuas, pero tampoco tan dispersas en apariencia como las anteriores. Por su parte, las variables cuánticas que describen la partícula en estas simulaciones también produjeron características caóticas en mapas de Poincaré.



7. LOS DISPOSITIVOS SUPERCONDUCTORES DE INTERFERENCIA CUANTICA, o SQUID, muestran caos semicuántico. Un anillo superconductor y un resonador de corriente alterna acoplados desarrollaron un comportamiento cuántico caótico. El equipo de la universidad de Sussex que efectuó el experimento calculó además soluciones que expresan la dinámica observada en el sistema. El comportamiento de este circuito se visualiza en la sección de Poincaré mostrada, que es una relación entre el voltaje a través del resonador clásico acoplado y el flujo magnético en la espira, o inductor del circuito tanque (circuito oscilatorio). La imagen fue generada mediante el cambio de los parámetros del sistema.

CORTESIA DE T. D. CLARK, *Universidad de Sussex*

De esta clase de sistemas, donde tanto las componentes clásicas como las cuánticas tienen aspectos caóticos, puede decirse que exhibe *caos semicuántico*. El movimiento clásicamente caótico del radio conduce al *caos ondulatorio* de los modos normales dentro del billar esférico que vibra radialmente. En otras palabras, el caos surge en las ondas que rebotan dentro de la esfera porque dependen del radio de la esfera: si el radio muestra caos, lo mismo les pasará a las ondas asociadas.

Es posible convertir un billar que vibra en un sistema por entero cuántico. Requiere, eso sí, establecer las condiciones de frontera del billar en términos cuánticos en vez de clásicos; se tendrá así un sistema plenamente cuantizado. Por ahora, no se sabe si hay en la naturaleza un sistema plenamente cuantizado con dependencia sensible de las condiciones iniciales. Sólo una minoría ha aceptado los pocos ejemplos de caos cuántico genuino que se han propuesto.

La búsqueda del caos a pequeñas escalas

Nuestro trabajo sobre las simulaciones de caos cuántico se extiende más allá de las matemáticas y la física teórica y llega a las aplicaciones. Con las técnicas desarrolladas para el estudio del caos cuántico se crean modelos de una amplia variedad de fenómenos de escala atómica. Tales simulaciones mejoran nuestro conocimiento de cómo actúan los sistemas a escala nanométrica; gracias a ello, quizá aprendamos a controlarlos mejor.

En algunos aspectos, estas simulaciones parecen aplicables sobre todo a los llamados puntos cuánticos. Un punto cuántico es una estructura que no mide más de unos nanómetros, compuesta de un se-

miconductor —arseniuro de indio, arseniuro de galio o silicio— o un metal. La estructura debe ser tan pequeña que atrape sólo unos pocos electrones. Aunque los billares cuánticos vibratorios pueden ser útiles para estudiar los puntos cuánticos, es más corriente que se recurra a los billares cuánticos de frontera estacionaria. Cuando tienen formas irregulares —como los billares clásicos de estadio y de Sinai de que hablamos al principio— exhiben otra forma de caos cuántico, el *caos cuantizado*, que describe las características cuánticas del caos clásico.

Un punto cuántico puede estudiarse tomando como modelo una partícula, o unas pocas partículas, encerrada en una caja. Con un conocimiento más hondo de los puntos cuánticos, cabe pensar en mejorar su utilización como conmutadores binarios.

Además, las ideas del caos a escala cuántica podrían mejorar los conmutadores convencionales o los propios transistores, especialmente los fabricados por medios poco corrientes. Así, Hongkun Park y sus colaboradores del Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley han construido hace poco un transistor unimolecular conectando una buckybola a unos electrodos de oro. (Una buckybola es una molécula de 60 átomos de carbono conformada como un balón de fútbol, con un diámetro del orden de un nanómetro.)

El grupo de Park estudió las vibraciones de estos nanotransistores, a través de los cuales sólo puede fluir un electrón a la vez. Imaginemos una buckybola en reposo entre dos electrodos. Rebotará a medida que los electrones salten adentro y afuera de la molécula. Simplifiquemos la buckybola; considerémosla una esfera. Tendremos así un sistema similar a ese que hemos estado comentando antes, sólo que ahora la esfera no vibra, rebota. Esta diferencia se refleja en el hamiltoniano, aunque también existen en este caso dos componentes, uno clásico y otro cuántico. Si se toma en cuenta la geometría real de la buckybola, las complicaciones aumentan mucho.

Las técnicas del caos cuántico se pueden aplicar a los nanotubos de carbono, semejantes a las buckybolas, sólo que su patrón repetitivo se extiende formando un tubo en lugar de una bola. Su longitud varía entre unos micrometros y varios milímetros; vienen a tener un nanómetro de diámetro. Sus dimensiones —tanto su longitud como su diámetro— vibran de manera similar a la esfera de nuestras simulaciones. Además, los nanotubos vibran también como una cuerda de guitarra, es decir, de manera que el tubo entero oscile, pero mantenga su forma. Muchos de estos aspectos de los nanotubos no han sido explorados todavía mediante modelos como los nuestros. No obstante, sabemos que un electrón atrapado en un nanotubo con forma de tubo de pastillas —un cilindro con tapas esféricas en ambos extremos— experimentaría fenómenos caóticos. Esperamos que gracias a los billares cuánticos se estudien más a fondo las nanocornetas, estructuras de carbono a cuya forma alude su nombre.

El caos semicuántico ofrece también modelos para otra clase de sistemas reales. Se ha observado ese tipo de comportamiento en los dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID). Realizan las mediciones más sensibles de campos magnéticos. No ocupan mucho espacio, por lo normal no más de un milímetro, pero ese milímetro contiene un buen número de componentes. Para montar un SQUID se necesita, antes que nada, un superconductor, un material que, a una temperatura muy baja, carezca de resistencia eléctrica y, por tanto, conduzca corriente sin perder energía. En el SQUID se le dará forma circular, a veces cuadrada, y recibirá energía de un oscilador eléctrico que le aplicará una corriente; se generará con ello una caída de potencial en el SQUID. Cuando se expone un SQUID a un campo magnético, ese voltaje cambia de manera que la magnitud del cambio mide la intensidad del campo magnético. Para entender mejor el comportamiento global de un SQUID, Joseph Diggins y sus compañeros de la Universidad de Sussex se valieron de la mecánica cuántica para elaborar un modelo del movimiento de los electrones en el anillo superconductor. También encontraron fenómenos caóticos en este sistema de dimensiones atómicas.

A medida que avance la búsqueda, se espera que emerjan una y otra vez aspectos caóticos en el reino cuántico. Esta bestia mítica, sin embargo, puede mostrarse beneficiosa. Un mejor conocimiento de la fenomenología nanométrica contribuiría a que los diseñadores proyectasen dispositivos más sencillos de manejar. En cualquier caso, queda aún mucho trabajo por hacer, tanto en la teoría como en las aplicaciones, en este campo todavía bastante joven; numerosos problemas no han sido ni siquiera abordados hasta ahora. Como hemos mostrado aquí, sin embargo, esta teoría cuenta con una bella estructura matemática y cabe esperar que ayude al progreso en bastantes áreas de la física, tanto teóricas como prácticas.

Bibliografía complementaria

CHAOTIC DYNAMICS IN THE RF SUPERCONDUCTING QUANTUM-INTERFERENCE-DEVICE MAGNETOMETER: A COUPLED QUANTUM-CLASSICAL SYSTEM. J. Diggins, J. F. Ralph, T. P. Spiller, T. D. Clark, H. Prance y R. J. Prance, en *Physical Review E*, vol. 48, págs. 1854-1859. 1994.

WAVE CHAOS IN THE STADIUM: STATISTICAL PROPERTIES OF SHORT-WAVE SOLUTIONS OF THE HELMHOLTZ EQUATION. S. W. MacDonald y A. N. Kaufman, en *Physical Review A*, vol. 37, págs. 3067; 1998.

QUANTUM CHAOS FOR THE RADIALLY VIBRATING SPHERICAL BILLIARD. R. L. Liboff y M. A. Porter, en *Chaos*, vol. 10, págs. 366-370; 2000.

NANOMECHANICAL OSCILLATIONS IN A SINGLE-C_{60} TRANSISTOR. H. Park, J. Park, A. K. Lim, E. H. Anderson, A. P. Alivisatos y P. L. McEuen, en *Nature*, vol. 407, págs. 57-60; 2000.

IS SEMIQUANTUM CHAOS REAL? L. E. Ballentine, en *Physical Review E*, vol. 63, págs. 1-7, 2001.

NONADIABATIC DYNAMICS IN SEMIQUANTAL PHYSICS. M. A. Porter, en *Reports on Progress in Physics*, vol. 64, n.º 9, págs. 1165-1189; 2001.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Wolfgang Bürger

Ruedas de ferrocarril

Todos utilizamos el tren con la confianza de que se mantendrá en sus raíles. A quien viaje por un recorrido lleno de curvas, como el que va de Karlsruhe a través del Albtal subiendo a la Selva Negra, las fuertes sacudidas a un lado y otro con que los carriles mantienen el tren en su curso podrán a veces infundirle dudas respecto a la seguridad de la guía que aportan. ¿Qué fuerza ha de tener un golpe para que encarrile un vagón o quizá hasta un tren entero?

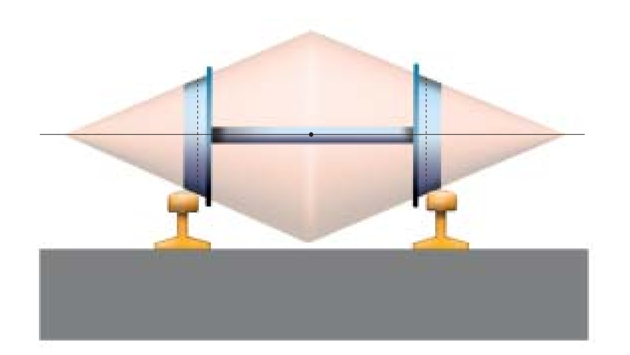


Hace más de cien años, algo similar le debió de pasar por la cabeza al consejero de vías férreas Klingel, de Karlsruhe. Fue el primero en investigar el movimiento serpenteante o sinusoidal de los vehículos sobre carriles con minuciosidad científica. Percibía "las oscilaciones" de los coches "alrededor de un eje vertical que atraviesa el baricentro" (las sacudidas en el plano de los carriles) como "un movimiento en suma medida desagradable" y constató "lo difícil que era prevenirlos".

Pequeñas variaciones con respecto a una línea recta perfecta no sólo son inevitables en los ferrocarriles de largo recorrido debido a su alta velocidad; también las sufren tranvías y ferrocarriles metropolitanos, pese a ser más lentos. Hasta mediados del siglo pasado circulaban todavía en las grandes ciudades muchos viejos tranvías, cuyas cajas —debido a las estrechas curvas en las calles angulosas— descansaban sobre un chasis único de doble eje, con una distancia entre ejes reducida. Al acelerar y al frenar, o en las curvas, el recinto de los pasajeros se inclinaba y giraba sobre su suspensión en todas direcciones. Para tomar bien los giros necesarios y corregir los indeseables con pequeñísimas fuerzas, los vagones de pasajeros descansan hoy sobre dos bogies o carretones giratorios —un par de grupos de ruedas con sus ejes y suspensión—. Se encuentran tan cerca de los extremos de los vagones como lo permitan en las curvas los salientes laterales de estos vehículos.

Aparte de movimientos en el plano de los carriles, Klingel se tuvo que ocupar en su época de las inclinaciones del vagón debidas al golpeteo producido por las pequeñas interrupciones entre dos segmentos consecutivos de los carriles que se dejaban para compensar la gran dilatación térmica del acero en los meses del verano. Se temía entonces que, bajo una presión en sentido longitudinal demasiado grande, los carriles se doblarían hacia los lados. Ya que las separaciones contra la dilatación de ambos carriles se encontraban por lo común una frente a la otra, cuando el tren pasaba sobre ellas se sentía una sensación como si las ruedas cayeran cada vez por un pequeño escalón, con lo que se oía un ruido rítmico, un "tam-tata-tam".

Actualmente, se sueldan los raíles en una cinta "sin fin" a una temperatura de unos veinte grados, a ser posible en ausencia de tensiones, a partir de piezas de sesenta metros, para que ni en verano ni en invierno alcancen una tensión por compresión o por tracción demasiado grandes. Así aumenta la comodidad del pasajero y al mismo tiempo disminuyen el desgaste de los carriles y los ruidos molestos del viaje tanto cerca como lejos de las vías.

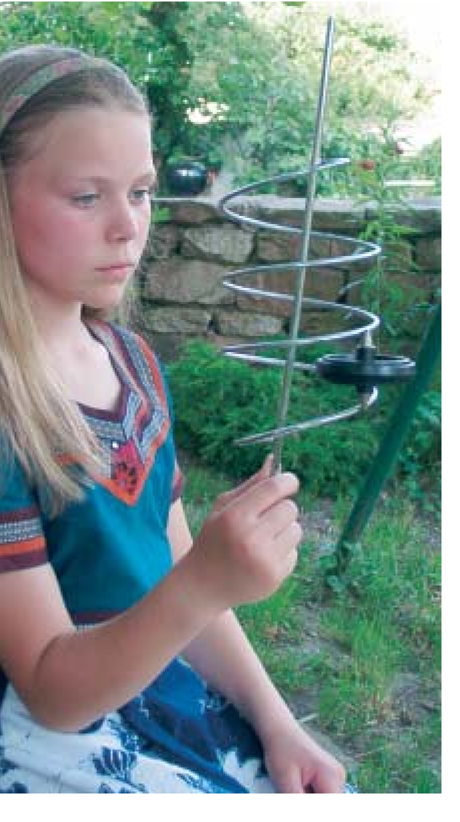


1. De entrada, para la cinemática no hay diferencia alguna si lo que gira sobre los carriles es un verdadero eje montado de ferrocarril o un doble cono

Un bogie de juguete

Un tren tiene tantas componentes que, en teoría, su funcionamiento combinado durante el viaje apenas se puede dilucidar teóricamente; sólo con mucha práctica se lo domina. Cada par de ruedas guiadas por los carriles junto con su árbol de transmisión forman una unidad sólida, el eje montado. Cada carretón lleva un par de ejes montados. El vagón descansa sobre dos carre-

ELKE REINECKE (*fotografías*); THOMAS BRAUN (*dibujos*)



2. En este juguete magnético, cada par de tramos sucesivos de la espiral hace las veces de los raíles del tren

tones y los vagones están conectados entre sí en el convoy mediante enganches. Sólo el movimiento del menor de los eslabones de esta cadena de efectos, el eje montado, se puede comprender sin necesidad de estudio detenido. Podemos convertirlo en un juguete: se elimina el reborde interior de la llanta y se completan las superficies de rodadura cónicas hasta formar un doble cono simétrico.

Se encuentra ese montaje, como juego, en algunos museos de la técnica. Pero hacer uno es muy sencillo: basta pegar por la boca dos vasos cónicos de plástico. Como carril provisional valen dos tablones pulidos, separados por una distancia de unos diez centímetros, idónea para el tamaño del doble cono. Se colocan ligeramente inclinados y se deja que el juguete ruede solo sobre los carriles.

El punto medio S del doble cono, situado en su mayor sección transversal, describe, en un recorrido recto, una línea serpenteante. Para pequeñas amplitudes de oscilación alrededor del eje central entre los carriles, esta línea ondulada es en buena aproximación una sinusoide. Aun sin calcular, se comprende que los radios de ambos conos tienen que crecer hacia el medio para que la trayectoria siempre regrese otra vez al centro. Sólo entonces, cuando el doble cono se desvíe, digamos, hacia la derecha, tendrá mayor diámetro en ese lado derecho que en el izquierdo, con lo que por giro recorrerá más camino en aquél que en éste y virará hacia la izquierda; la desviación se habrá compensado.

Las ruedas de los trenes tienen superficies cónicas de rodadura parecidas al doble cono. Si fueran cilíndricas (como las ruedas de los trenes de juguete), un eje montado y desviado del centro podría volver al camino de la virtud sólo cuando el reborde interior de una de las llantas encontrara un carril; el recorrido sinusoidal devendría un camino en zigzag. Para los grandes trenes supondría un problema. Un doble cono cuyo diámetro creciera de dentro hacia fuera no tendría manera alguna de mantenerse dentro de su pista. Si careciera de un reborde exterior, se saldría inmediatamente de los carriles.

Para medir la longitud de la sinusoide, dejemos caer el doble cono desde una posición descentrada, con su eje formando un ángulo recto con los carriles (en otras palabras: en la cima de la sinusoide). El trecho en sentido de la marcha que recorre hasta el siguiente punto de viraje en el lado opuesto, es justo la mitad de la longitud de onda. Sorprendentemente, el doble cono todavía sigue oscilando periódicamente de un lado a otro cuando su centro entra alternativamente en los carriles por la izquierda y por la derecha. Cuidado: cuando la línea central (la junta de unión entre los vasos de plástico) roza el carril es fácil que resbale.

Juego y realidad

El recorrido sinusoidal del doble cono nos aclara lúdicamente cómo gira un eje montado sobre dos raíles. En las condiciones reales del tránsito ferroviario, el modelo de ruedas circulares que rotan sobre raíles rectos y sólo los tocan en un punto resulta demasiado simple. Tanto las superficies de rodadura como las vías se deforman bajo la gran carga; en el caso más sencillo, elásticamente. La zona de contacto no es un mero punto sino una superficie, y además de rotación pura hay deslizamiento. El problema de cinemática se transforma en uno dinámico que aquí no se puede resolver.

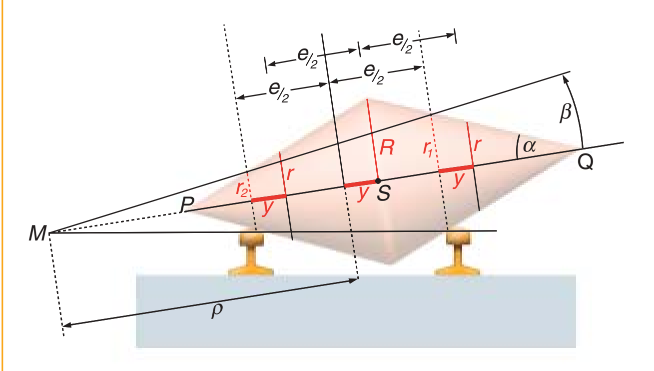
El sistema rueda-carril lleva mostrándose sorprendentemente fiable desde hace más de un siglo. Tolera que se desgasten carriles y diámetros de las ruedas, varios centímetros y de cinco a diez centímetros respectivamente, durante su vida útil (según un informe de 1992 de los ferrocarriles alemanes, las ruedas de las locomotoras de alta velocidad pasan de 104 a 95 centímetros de diámetro). Aún falta experiencia sobre la seguridad del ferrocarril a muy altas velocidades. Probablemente, el futuro del transporte a alta veloci-



3. El doble cono construido con un par de vasos se mueve con suavidad a lo largo de los "carriles" oscilando de derecha a izquierda y al revés

Geometría del recorrido sinusoidal

¿Qué devuelve el eje montado a su equilibrio?



Sobre una vía de ancho *e* se mueve el doble cono con el ángulo de apertura 2α y el radio máximo *R*. En un recorrido recto rueda sobre dos círculos del mismo radio *r*. Si estuviera desviado a un lado lateralmente en una distancia *y*, rodaría sobre círculos con radios r_1 y r_2 —suponiendo que los carriles estuvieran arqueados en un círculo cerrado de manera que pudiera mantener esta forma de movimiento a la larga—. Llamemos al radio de ese círculo ρ, medido hasta la línea media de la separación entre los carriles. El movimiento del doble cono sería en dicho caso idéntico al de un cono imaginario, el "cono rodante", con el vértice *M* y el ángulo de apertura 2β, que igualmente muestra los radios r_1 y r_2 en los puntos de contacto con los carriles. Por las leyes de semejanza para *M* se obtiene que

$$\frac{r_1}{\rho + e/2} = \frac{r_2}{\rho - e/2} = \tan\beta$$

y de ello

$$\rho = \frac{e}{2}\,\frac{r_1 + r_2}{r_1 - r_2}.$$

Como r_1 y r_2 dependen de *y*, se obtiene de las leyes de semejanza para las puntas del doble cono *P* y *Q*:

$$\frac{R - r_1}{e/2 - y} = \frac{R - r_2}{e/2 + y} = \frac{R - r}{e/2} = \tan\alpha;$$

esto implica que $r_1 = r + y\,\tan\alpha$ y $r_2 = r - y\,\tan\alpha$. Substituyendo se obtiene que

$$\rho = \frac{e}{2}\,\frac{r}{y\tan\alpha} = \frac{a^2}{y}$$

con $a = \sqrt{er/(2\tan\alpha)}$.

Pero ahora los carriles no están arqueados, sino que son rectos; por ello la desviación *y* no es constante, sino que describe una curva $y(x)$ dependiendo del recorrido *x*. Su curvatura es en cada punto igual a la curvatura del círculo sobre el que el cono quiere rodar, igual al valor inverso, $1/\rho$, del radio de curvatura. Para pequeños valores de dy/dx, la curvatura es aproximadamente igual a la segunda derivada d^2y/dx^2 de *y* respecto a *x*. De ello se obtiene

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{\rho} = -\frac{y}{a^2}$$

como "ecuación de la oscilación" de la trayectoria (el signo negativo de la curvatura se desprende del dibujo). Sus soluciones son de la forma $y = c\,\mathrm{sen}(x/a + x_0)$. La longitud de onda del recorrido sinusoidal será $\lambda = 2\pi\, a = 2\pi\sqrt{er/(2\tan\alpha)}$. Para mis vasos de plástico, con un ángulo de apertura $2\alpha = 0{,}155$ (= 8,8 grados), un ancho de vía e = 12,5 cm y el radio del recorrido recto r = 3,0 cm, sale una longitud de onda λ = 99 cm. La observación ratifica el valor.

dad pertenezca al Transrapid: una guía por medio de fuerzas magnéticas bajo control externo, sin contacto con las cabinas de los pasajeros.

Yoyó magnético

Este pequeño juguete presenta en un volante de unos seis centímetros de diámetro innumerables variantes de la marcha ondulante cinemática de un doble cono. El eje de transmisión del volante apoya sus extremos cónicos en dos alambres de acero de unos dos a tres milímetros de grosor, a modo de carriles. El peso no presiona la rueda contra esos carriles, sino unos imanes instalados en el eje. Para empezar, hay juego gracias a los imanes, pero por otra parte el movimiento de éstos provoca unas corrientes de Foucault que frenan el volante.

El nombre "yoyó" nos trae a la mente ese disco giratorio sujeto a una cuerda que, cuando ha descendido toda la extensión de ésta, regresa a nuestra mano. En el yoyó magnético el volante vuelve porque la pista se ensancha inapreciablemente en sus dos puntos de cambio de sentido del movimiento. Al cambiar de sentido, la rueda gira hacia el otro lado de los carriles tal y como el yoyó clásico gira hacia el otro lado de la cuerda. Así se puede enviar la ruedecita de un lado para otro y alterando la cadencia de la oscilación proporcionarle grandes velocidades.

Hace algunos años apareció en la feria de juguetes de Nuremberg una nueva variante de juego del yoyó magnético. El alambre está enrollado en forma de tornillo. Cada dos vueltas consecutivas sirven de par de carriles —una especie de yoyó monocarril con un largo recorrido en el reducido tamaño del artilugio—. Dando vueltas al tornillo de un lado para otro, también aquí se pone en vertiginoso movimiento el volante.

El observador cuidadoso verá claramente en ambos juguetes el recorrido sinusoidal del volante, con longitudes de onda de pocos centímetros.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

Fluctuaciones fatales

Disponemos de un cultivo de bacterias que crece por división de cada uno de los individuos que lo forman. Supongamos que, de un día para otro, cada bacteria tiene una probabilidad 1/5 de morir, una probabilidad 3/5 de duplicarse y una probabilidad 1/5 de seguir viva sin reproducirse. Si inicialmente hay 1000 bacterias en la colonia, aproximadamente 200 morirán, 600 se duplicarán y 200 se mantendrán vivas sin reproducirse. Al día siguiente tendremos, por tanto, 1400 bacterias vivas. Es decir, en media, la población crece un 40 % cada día: el segundo día habrá 1960 individuos, el tercer día 2744, y así sucesivamente. La población crece exponencialmente si nuestras suposiciones acerca de la reproducción y muerte se siguen manteniendo. En diez días, por ejemplo, la colonia alcanzaría casi los 30 mil individuos y en doscientos días llegaría hasta 10^{32}. Este número es demasiado grande para un cultivo real, lo cual indica que las suposiciones no se pueden mantener durante todo el tiempo debido a que la competencia entre las bacterias por los nutrientes o simplemente por el espacio dentro del cultivo hará sin duda disminuir las probabilidades de reproducción y aumentar las de muerte. En consecuencia, nuestro modelo simplificado sólo puede ser válido para poblaciones pequeñas y para los primeros días de evolución de la colonia. Aun así, su análisis revelará algunos efectos interesantes.

Como acabamos de ver, la población de la colonia de bacterias crece, en media, día tras día. La indicación "en media" es aquí muy relevante. "En media" significa que sólo aproximadamente 1/5 de las bacterias morirán de un día para otro y sólo aproximadamente 3/5 se reproducirán, igual que sólo aproximadamente 1/6 de las veces obtenemos un cinco cuando lanzamos un dado no trucado. Cuantas más veces lanzamos el dado, más se acercará la fracción de cincos a 1/6. No obstante, siempre habrá algunas desviaciones con respecto a 1/6 (que no es otra cosa que la probabilidad de que salga un cinco). Estas desviaciones suelen llamarse "fluctuaciones".

Las fluctuaciones son menores cuanto mayor es el número de tiradas del dado y, en el caso de la colonia, serán menores cuanto mayor sea la población de bacterias. Así, si inicialmente el cultivo dispone de 1000 bacterias, las fluctuaciones no serán muy importantes: morirán unas 200 y se reproducirán unas 600. Las pequeñas desviaciones con respecto a estos valores no cambiarán demasiado el comportamiento del cultivo, que crecerá, como hemos visto, aproximadamente en un 40 % cada día. En pocas palabras: en poblaciones grandes, los valores medios son casi iguales a los valores reales. Por el contrario, en poblaciones pequeñas las fluctuaciones pueden ser de vital importancia.

¿Qué ocurre si, inicialmente, disponemos de una única bacteria? Al día siguiente nos encontraremos que nuestro valioso y solitario individuo ha muerto con una probabilidad 1/5 y se ha reproducido con una probabilidad 3/5. Si ha muerto, la colonia se habrá extinguido irremediablemente. Si se ha reproducido, podemos mantener la esperanza de que la colonia crezca en los próximos días, aunque bien pueden estos dos individuos morir al día siguiente, algo que ocurrirá con probabilidad $1/5 \times 1/5 = 1/25$. Es evidente que los primeros días de esta colonia mínima son bastante críticos. Los escasos individuos que la forman son los patriarcas de una familia que, sólo al alcanzar un cierto tamaño, estará libre de desaparecer debido a "fluctuaciones fatales". Esto es lo que probablemente ocurre en la evolución de las especies. Cuando se produce una mutación, sólo un individuo es portador de la misma. Por tanto, aunque la mutación sea ventajosa, su éxito depende de la suerte que corra este único portador de la mutación y sus inmediatos descendientes. Podemos comprobarlo analizando el comportamiento de nuestra colonia. En la figura se dibuja su tamaño en función del tiempo para diferentes simulaciones hechas por ordenador. De las nueve simulaciones, sólo cinco prosperaron, mientras que cuatro se extinguieron en los primeros seis días. Observen que, en estos primeros días, cualquiera de las nueve corre el riesgo de extinguirse.

¿Cuál es la probabilidad de que, partiendo de un solo individuo, la colonia se extinga? En otras palabras, si repetimos el experimento de la figura un gran número de veces, ¿qué fracción de trayectorias acaba cayendo en el eje horizontal? El cálculo de esta *probabilidad de extinción* es un problema muy complicado a primera vista. Si en el primer día la colonia consta de un solo individuo, en el segundo se habrá extinguido con probabilidad 1/5, seguirá con un solo individuo con probabilidad 1/5 o tendrá dos con una probabilidad 3/5. En el tercer día las posibilidades aumentan: la colonia puede ahora constar de cero hasta cuatro individuos. Para calcular la probabilidad de cada una de estas posibilidades hay que tener en cuenta todos los modos en que cada población puede alcanzarse. Por ejemplo, la población de cuatro individuos en el segundo día sólo puede alcanzarse si el patriarca se reprodujo en el primero y segundo día y su vástago lo hizo en el segundo. Eso ocurre con probabilidad $3/5 \times 3/5 \times 3/5$. La probabilidad de que la colonia se extinga en el segundo día puede calcularse del mismo modo: o bien el patriarca muere el primer día (probabilidad 1/5), o bien sobrevive al primer día pero muere en el segundo (probabilidad $1/5 \times$

× 1/5) o bien se reproduce el primer día pero tanto él como su hijo mueren en el segundo día (probabilidad 3/5 × 1/5 × 1/5). Por lo tanto, la probabilidad de que la colonia se extinga en el segundo día es

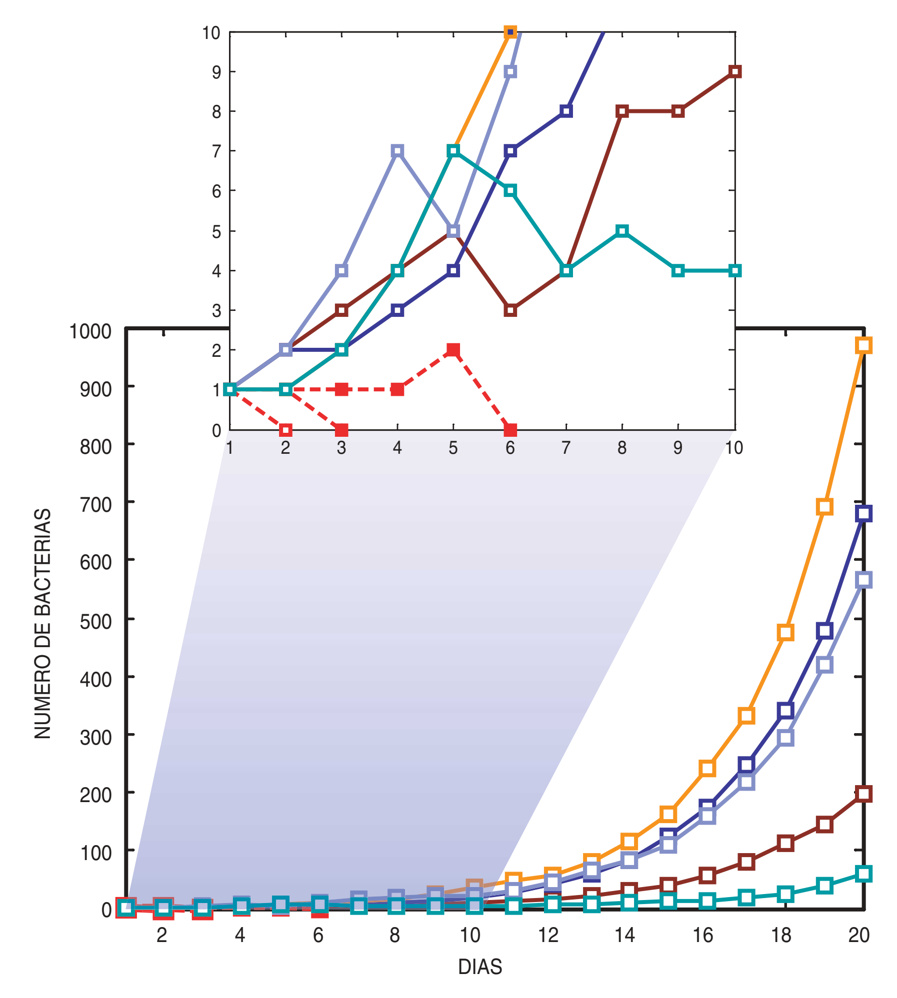
$$q = \frac{1}{5} + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{1}{5}\right) + \frac{3}{5} \cdot \left(\frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5}\right) = \frac{33}{125}$$

en donde he colocado entre paréntesis las probabilidades de los eventos que ocurren en el segundo día, por razones que serán evidentes dentro de un momento.

Este modo de calcular la probabilidad de extinción se complica considerablemente al añadir más días, ya que el árbol de posibilidades se va ramificando un día tras otro. Existe, sin embargo, un método bastante ingenioso para calcular la probabilidad de extinción. Llamemos q a esta probabilidad, es decir, a la probabilidad de que se extinga una colonia que inicialmente consta de un solo individuo. ¿Cuál es la probabilidad de que se extinga una colonia que parte de *dos* individuos? Como la "estirpe" de cada individuo no interacciona con la del otro (no hay ni reproducción sexual ni competencia), la probabilidad de que se extingan las dos estirpes será $q \times q$ o q^2 (igual que la probabilidad de sacar un seis doble al tirar dos dados es 1/6 × 1/6).

Volvamos ahora a la colonia que parte de un solo individuo. En su segundo día pueden haber ocurrido tres cosas: A) que el patriarca haya muerto (probabilidad 1/5), B) que siga vivo sin reproducirse (probabilidad 1/5) y C) que se haya reproducido (probabilidad 3/5). Si nos situamos en este segundo día, ¿cuál es la probabilidad de extinción para cada una de estas tres posibilidades? Para A es claramente 1 puesto que la colonia ya está extinta en el segundo día. Para B, la probabilidad de extinción es de nuevo q. Y para C, como hemos visto en el párrafo anterior, la probabilidad de extinción es q^2. La probabilidad q de que se extinga la colonia inicial se puede escribir entonces como una suma que tenga en cuenta estas tres posibilidades:

$$q = \frac{1}{5} + \frac{1}{5} q + \frac{3}{5} q^2$$



Simulación por ordenador de la colonia de bacterias que se describe en el texto. De las nueve veces que se realizó la simulación, en cuatro ocasiones la colonia se extinguió y sólo en cinco continuó creciendo exponencialmente. En la ampliación de los primeros días puede verse, en rojo y línea discontinua, la trayectoria de las colonias extinguidas. Sólo pueden verse tres porque dos de las colonias se extinguieron en el segundo día y sus breves trayectorias coinciden

Ahora tenemos una ecuación bastante simple para q. Lo que en realidad hemos hecho para llegar a esta ecuación es tomar las tres primeras ramas del árbol de posibilidades del que hablábamos antes y darnos cuenta de que cada una se puede tratar como un nuevo árbol de posibilidades. Fíjense que esta ecuación es la misma que la anterior, pero sustituyendo los dos paréntesis por q y q^2, respectivamente.

La solución de la ecuación anterior es $q = 1/3$ ($q = 1$ es también solución, pero no tiene ningún significado ni interés en el problema). Es decir, si hiciéramos un gran número de simulaciones con las probabilidades de muerte y reproducción de nuestra colonia, un tercio de ellas acabarían extinguiéndose. Observen que en el segundo día sólo se extingue 1/5. El resto, 2/15, lo hace en días sucesivos.

Piensen ahora que la colonia de bacterias que consta de un solo individuo puede ser una nueva mutación naciente en la biosfera, el virus solitario que inhalo antes de contraer la gripe e incluso un neutrón que surge al azar en un material radioactivo y puede comenzar una reacción en cadena. En todos estos casos las fluctuaciones iniciales son críticas. Pueden destruir la mutación, la posibilidad de proliferación del virus o hacer que el efecto del neutrón no vaya más allá de unos cuantos destellos de radiación. Son sólo pequeños golpes de azar, pero capaces de cambiar por completo el destino de toda la biosfera.

Mark Fischetti

Diamantes sintéticos

Los compradores hallan cada vez más difícil distinguir un diamante sintético de una gema auténtica. Desde la década de 1950 los científicos consiguen imitaciones depositando átomos de carbono sobre diminutos diamantes —*chispas*— naturales o sintéticos, en condiciones de alta presión y alta temperatura. Pero un control cada vez más ajustado del gradiente de temperatura en torno a la chispa está eliminando las delatadoras imperfecciones que un día los joyeros podían detectar con una lupa.

La chispa crece poco a poco durante su fabricación artificial; así, los átomos que el proceso aporta no quedan atrapados en la piedra en desarrollo, fallo que produce unas inclusiones visibles. Conseguir un diamante de un quilate lleva una semana. Los diamantes para herramientas de corte industriales pueden fabricarse más deprisa; las inclusiones no reducen la dureza. Los revestimientos diamantinos policristalinos para herramientas se hacen mediante depositado químico en fase de vapor.

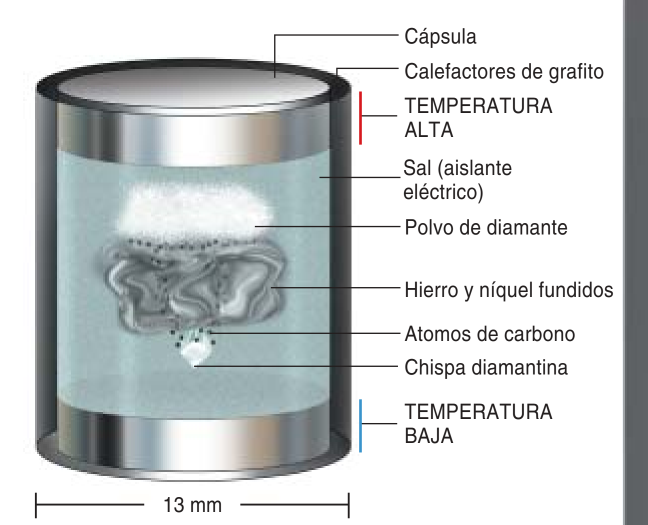
Los dos principales fabricantes de diamantes sintéticos industriales —General Electric y el rey de los diamantes naturales De Beers— aún emplean la prensa "de correa" original, que comprime la chispa con sus émbolos (ni uno ni otro venden piedras preciosas sintéticas). Físicos rusos han perfeccionado una prensa esférica que se dice mejora el control del depositado y genera más rápido unas gemas más claras, pero los detalles están patentados. Gemesis, un nuevo competidor de Sarasota (Florida), contrató hace poco a varios "alquimistas" rusos y adquirió los planos para producir miles de gemas sintéticas al año.

La carrera de los diamantes ha obligado a los laboratorios de detección a ingeniar instrumentos contra el fraude más refinados. El Laboratorio Gemológico Adamas, de Brookline (Massachusetts), ha desarrollado un espectrofotómetro que ilumina con luz de espectro completo las piedras y detecta las longitudes de onda específicas que absorben las agrupaciones de átomos de nitrógeno, corrientes en las piedras naturales, pero no en las artificiales. Otros instrumentos captan la fotoluminiscencia de las piedras bajo luz láser.

Preocupa a los distribuidores de diamantes que la difusión de las piedras sintéticas de calidad pueda erosionar la confianza de los consumidores en las gemas auténticas. Pero si una piedra sintética es igual, átomo a átomo, a una natural, ¿no es acaso un diamante auténtico?

DANIELS & DANIELS (*ilustraciones*); ADAMAS GEMOLOGICAL LABORATORY (*gráfico*); CORTESIA DE CHRIS WELBOURNE *De Beers DTC Research Center*

1. LOS PISTONES HIDRAULICOS de una prensa comprimen la pequeña cápsula donde se encierra la chispa de diamante hasta una presión del orden de 55.000 atmósferas. Una corriente eléctrica eleva la temperatura de la cápsula hasta 1400 grados o más.



2. EL POLVO DE DIAMANTE encerrado en la cápsula se difunde, en uno de los procedimientos industriales existentes, por una mezcla fundida de hierro y níquel. El polvo se disuelve en el líquido caliente y luego se precipita, de átomo de carbono en átomo de carbono, sobre la chispa, más fría y situada debajo, del mismo modo que el vapor de agua se precipita en forma de niebla y se adhiere a la hierba, más fresca, como rocío. La chispa es un fragmento de diamante natural o sintético y crece a razón de un quilate por semana. Si la presión se reduce, los átomos de carbono forman grafito.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **JOYAS CUBICAS:** Las "gemas" cúbicas de circonio fueron los primeros diamantes simulados con éxito, pero cabe clasificarlas como sintéticas ya que no contienen carbono. A la presión atmosférica y a unos 2400 ºC se mezcla polvo de óxido de circonio con otros componentes —óxido de calcio o de magnesio—; el resultado se cristaliza al enfriarse. Unos sencillos detectores térmicos bastan para detectar estas falsas gemas.

➤ **JOYAS DEFORMADAS:** Los diamantes no son del todo carbono puro; en ocasiones, otros átomos ocupan lugares en el cristal, confiriendo color a la piedra, como es el caso del nitrógeno (amarillo) o el boro (azul). En torno al 1 por ciento de los diamantes está libre de nitrógeno, pero puede que tengan un matiz marrón a causa de la deformación del cristal. Con una prensa de diamantes sintéticos, más de 60.000 atmósferas y hasta 2500 ºC se enderezan los planos cristalinos deformados y se crean gemas perfectamente limpias en cuestión de minutos. Así, unos "marrones" adquiridos por unos pocos cientos de euros podrían venderse por 10.000 euros una vez clareados, posiblemente con más beneficio que fabricando diamantes sintéticos a partir de chispas, que es caro.

➤ **EL PRIMERO:** La primera consecución de un diamante sintético se atribuye a Baltazar von Platten, del Laboratorio de la ASEA en Estocolmo, en 1953, aunque no publicó sus resultados. En 1955 un equipo de la General Electric, dirigido por H. Tracy Hall, consiguió transformar por primera vez, que se sepa, carbono en un diamante. Actualmente, Hall y su hijo, David R. Hall, dirigen la empresa Novatek, en Provo (Utah), fabricante de las prensas para fabricar diamantes sintéticos.

Presión

Corriente eléctrica

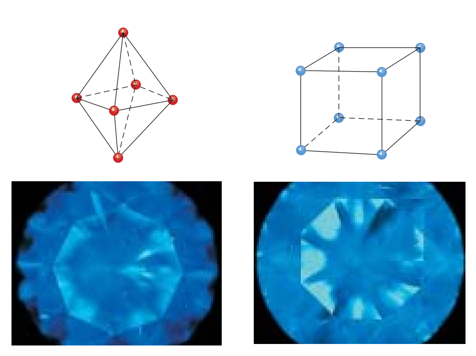
PARED

CAPSULA

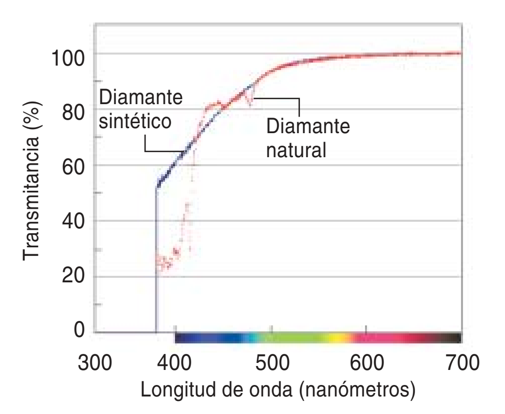
PISTON

Presión

BRAZO HIDRAULICO



3. EL DIAMANTE NATURAL (*izquierda*) posee una estructura cristalina octaédrica, visible por fluorescencia bajo luz ultravioleta. Un diamante sintético (*derecha*) contiene sectores cúbicos, asimismo visibles por fluorescencia.



4. EL ESPECTROFOTOMETRO hace pasar luz formada por el espectro visible completo a través de un diamante natural y otro sintético del mismo color y calidad. Los átomos de nitrógeno de la piedra natural absorben la luz azul según un patrón característico, cosa que no hace la piedra artificial.

Filosofía natural

en el Barroco

DIE PHILOSOPHIE DES 17.JAHRHUNDERTS. 4. DAS HEILIGE RÖMISCHE REICH DEUTSCHER NATION NORD- UND OSTMITTELEUROPA. Edición preparada por Helmut Holzhey y Wilhelm Schmidt-Biggemann con la colaboración de Vilem Mudroch. Schwabe & Co. AG. Verlag; Basilea, 2001. **THE INFLUENCE OF PETRUS RAMUS. STUDIES IN SIXTEENTH AND SEVENTEENTH CENTURY PHILOSOPHY OF SCIENCES.** Dirigido por Mordechai Feingold, Joseph S. Freedman y Wolfgang Rother. Schwabe & Co AG. Velarg; Basilea, 2001.

DESCARTES'SYSTEM OF NATURAL PHILOSOPHY, por Stephen Gaukroger. Cambridge University Press; Cambridge, 2002.

HENRY OLDENBURG, por Mary Boas Hall. Oxford University Press; Oxford, 2002. **GIOVANNI ALFONSO BORELLI. STORIA E METEOROLOGIA DELL'ERUZIONE DELL'ETNA DEL 1669.** Introducción y edición de Nicoletta Morello. Giunti; Florencia, 2001.

La eclosión del Barroco es más que un desbordamiento de la plástica en la Europa del siglo XVII. Centuria de guerras, paces y tratados, asiste al nacimiento de una nueva aproximación a la naturaleza y a las leyes que la rigen. Se consolida la ciencia moderna, si hacemos justicia a los importantes adelantos que le precedieron. Hubo, en efecto, continuidad, contigüidad y complementariedad de la nueva filosofía natural con la mecánica aristotélica y la fisiología galenista. Pero también drástica ruptura. El primer cambio, el más decisivo, es de orden epistemológico. Se abandonan gradualmente las explicaciones cualitativas de los fenómenos en la búsqueda de una razón cuantitativa de los mismos. Así se desprende de la lectura de *Die Philosophie des 17. Jahrhunderts. 4. Das Heilige Römische Reich Deutscher Nation Nord- und Ostmitteleuropa*, una revisión profunda de los filósofos, escuelas, tendencias y disputas de ese tiempo y espacio geográfico.

Las corrientes innovadoras prendieron muy pronto en Inglaterra, Francia, Italia y Holanda. En los países incluidos en ese cuarto volumen (en dos tomos) de *Die Philosophie des 17.Jahrhunderts* la predominante influencia jesuítica buscaba una mayor armonía con la tradición aristotélico-escolástica, sin dejar de abrir nuevos caminos en matemática y astronomía, sobre todo. Hasta finales de siglo no logró penetrar con fuerza el cartesianismo. Sin que ello desmerezca la importancia de voces discrepantes, en las universidades principalmente. Atomistas fueron en ese tiempo Sennert, Sperling y Gorlaeus; spinozista, Tschirnhaus; cartesianos, los Bernoulli. Pese a todo, el primer embate contra el aristotelismo procedió de los ramistas (*The Influence of Petrus Ramus. Studies in Sixteenth and Seventeenth Century Philosophy of Sciences*).

Los escritos lógicos de Pierre de la Ramée (*Ramus*, 1515-1572) gozaron de una difusión amplísima por Europa central. De 1543 data la primera edición de sus *Aristotelicae animadversiones* y *Dialectae partitiones*. En algo más de un decenio, la primera conoció diez ediciones; la segunda, que al poco de su impresión inicial trocó el título por el de *Dialecticae institutiones*, 16 ediciones por lo menos. Para hacernos una idea de la influencia escolar de esta *Enseñanza de la dialéctica*, cuyo título cambiará en alguna ocasión más, sépase que en su historia como manual docente conocerá más de sesenta reimpresiones. Un éxito que no pudo frenar la oposición de los profesores de la Universidad de París ni la del pedagogo por antonomasia de los centros protestantes, Melanchton.

Ramus acusaba a Aristóteles, Galeno, Cicerón, Quitiliano y Porfirio de confundir invención y juicio, así como de no separar lo necesario de lo contingente. Construye su dialéctica en oposición a la silogística. Con su radical "todo lo que dijo Aristóteles es mentira" se propuso elaborar un nuevo método de razonamiento, basado en el sentido común. Esa dialéctica natural debía seguir el proceder espontáneo de las artes y las ciencias. La dividía en dos partes, una primera de invención o descubrimiento de los argumentos y una segunda de juicio sobre lo hallado. Subdividía, a su vez la segunda en axioma (relación argumentativa en virtud de



René Descartes (1596-1650)

Vida y generación espontánea

THINGS COME TO LIFE. SPONTANEOUS GENERATION REVISITED, por Henry Harris. Oxford University Press; Oxford, 2002.

Henry Harris, científico conocido por sus contribuciones a la biología celular y sus trabajos sobre el cáncer, es también historiador de la ciencia. Dentro de esta última faceta, en el libro aquí reseñado trata de un tema que no sólo tiene un gran interés biológico, sino también filosófico y teológico, el problema de la generación espontánea.

Partiendo del planteamiento de esta cuestión en los orígenes de la ciencia en la Grecia clásica, describe con bastante detalle la larga saga de controversias ocasionadas por experimentos con resultados e interpretaciones contradictorios, llevados a cabo hasta principios del siglo XX en que la cuestión fue zanjada definitivamente, con la refutación de la generación espontánea. En una primera parte del libro trata de la generación espontánea de insectos. Después se refiere a la generación espontánea de microorganismos, descubiertos en el siglo XVII por Leeuwenhoek, utilizando el microscopio por él construido.

Al referirse a autores distinguidos en la historia de la biología que polemizaron sobre el tema de la generación espontánea, como por ejemplo Spallanzani que objetó las conclusiones, favorables a la generación espontánea a las que llegó Needham, a partir de experimentos realizados haciendo infusiones de materia orgánica, complementa el estudio para reseñar aspectos de su personalidad científica general.

Una peculiaridad del libro de Harris es no atribuir a Pasteur, como suele admitirse generalmente, las pruebas que refutaron definitivamente la generación espontánea. Presenta la polémica que se produjo entre Pasteur y Pouchet como otra de las muchas ocurridas anteriormente, por ejemplo la antes citada entre Needham y Spallanzani en el siglo XVII. Además, cita a Bastian, llamándole un Pouchet inglés, como otro defensor de la generación espontánea contemporáneo de Pasteur. La prueba definitiva la atribuye a Tyndall, quien, utilizando el efecto Tyndall, pudo comprobar por vía óptica la presencia o ausencia de partículas en las soluciones empleadas en los experimentos llevados a cabo para investigar la existencia de generación espontánea. De acuerdo con esto, Harris afirma: "si alguien administró el golpe mortal a la idea de la generación espontánea, este fue Tyndall, no Pasteur".

En el último capítulo, "Un epílogo sobre otro tema", se refiere, muy brevemente, a la cuestión del origen de la vida. Justifica la explicación científica de este proceso, como alternativa de la religiosa, afirmando que "las reconstrucciones de sucesos pasados invocados para explicar el origen de la vida son y quizá sólo pueden ser especulativas, pero que no lo son más que los que invocan la intervención divina para explicarlo".

—ANTONIO PREVOSTI PELEGRÍN

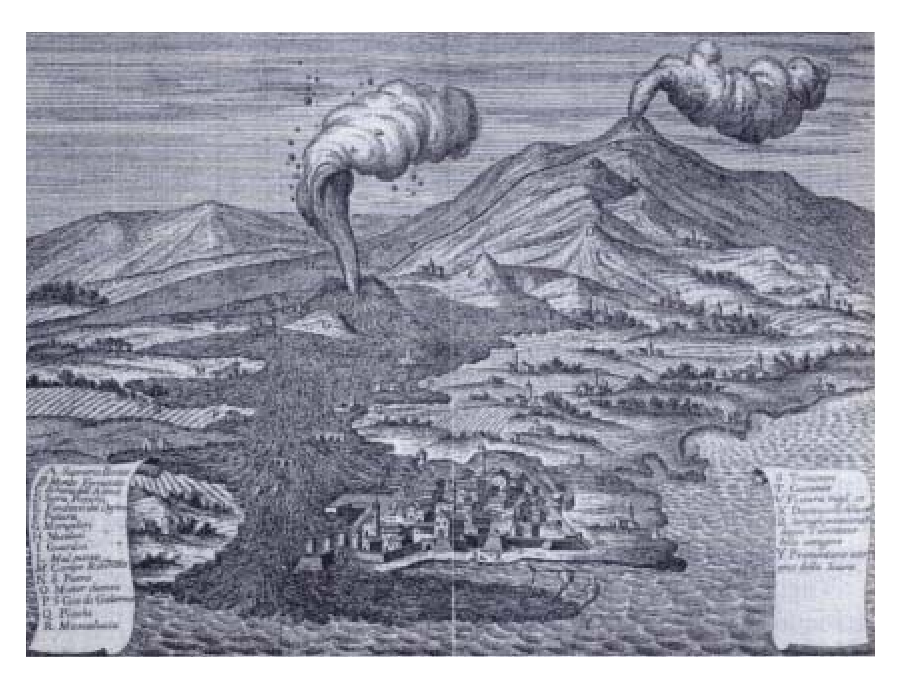
la cual decidimos sobre la existencia y realidad de lo afirmado) y dianoia, que es el procedimiento deductivo propiamente dicho, donde debe inscribirse el silogismo. Tres leyes, proponía, regulan el método de la dialéctica: sólo lo que es verdadero y necesario puede incluirse en un argumento (*lex veritatis*); todas las cosas, y sólo esas cosas, que pertenecen a la disciplina pueden incluirse (*lex iustitiae*), y las cosas generales deben tratarse de una manera general (*lex sapientiae*).

Especial acogida tuvieron las tesis de Ramus en los Países Bajos. En la Universidad de Leiden, fundada en 1575, ocuparon la cátedra de matemática dos ramistas famosos: Rodolphus Snellius van Royen y su hijo Willebrord. El primero enseñó y comentó la dialéctica, física y aritmética de Ramus, a quien Snellius había conocido personalmente en sus años de estudiante en Marburg. Rodolphus Snellius tuvo entre sus alumnos a Isaac Beeckman; le recomendó estudiar la geometría y la aritmética de Ramus. Aprovechándose en ese débil eslabón, algunos han querido ver una relación de continuidad entre Ramus y Descartes, vía Beeckman.

Sabido es que Isaac Beeckman introdujo a Descartes en la filosofía natural, con tal aplicación de éste, que su mentor llegaría a afirmar que ambos eran los únicos físico-matemáticos de su tiempo (*Descartes'System of Natural Philosophy*). La filosofía natural ocupa el centro de la inquisición cartesiana. Una inquisición creadora: encauzó la cosmología que llevaría a Newton, participó en la fundación de la óptica geométrica, algebrizó la geometría y puso en raíles físicos a la fisiología. La filosofía natural de Descartes halla su expresión definitiva en los *Principia Philosophiae*, aparecidos en 1644, en el crepúsculo de su vida (murió en 1650). Se proponía ofrecer la exposición acabada de su sistema, desde los principios del conocimiento y de la naturaleza hasta la antropología y la moral, pasando por la cosmología y la geología. De las seis partes proyectadas se publicaron sólo las cuatro primeras. Gaudroger "recupera" las dos restantes ("Sobre los seres vivos" y "Sobre el hombre") a partir de otros escritos de Descartes.

Desde la madurez, los *Principia* reelaboran y sistematizan escritos precedentes, publicados o inéditos. En la parte primera, dedicada a los principios del conocimiento, se torna a reflexionar sobre las cuestiones incoadas en las *Meditationes*, que depuran, a su vez, ideas de *La Discours de la Méthode*. Tras pasar revista a las diversas formas de duda escéptica, y eliminadas por la aplicación de la doctrina de las ideas claras y distintas, apuntala la metafísica en la epistemología. Significa ello que, al ocuparnos de algo, hemos de empezar por preguntarnos si existe, para pasar luego al estudio de sus propiedades. Pero sólo podemos preguntarnos si algo existe cundo tenemos una concepción clara y distinta de lo que es.

De los principios fundantes de la física trata la segunda parte de los *Principia*, síntesis de su teoría de la materia y la mecánica. Si la mecánica cartesiana aborda los procesos físicos en términos de los movimien-



Erupción del Etna (1669)

tos experimentados por los cuerpos y de las fuerzas responsables de tales movimientos, su teoría de la materia explica el movimiento de un cuerpo en razón de su propia composición. Conocido es, Descartes identifica materia con extensión o espacio. Aquí, y en el apartado siguiente (sobre "todos los fenómenos de la naturaleza"), arranca de lo que expuso en *Le Monde*. A propósito de los fenómenos importa empezar por los más universales, de los que dependen los demás. Para interpretarlos hemos de admitir dos principios. En primer lugar, no debemos suponer que conocemos los fines de Dios cuando creó el mundo; ni debemos creer que sólo lo hizo por el hombre. En segundo lugar, nuestro universo no es el único compatible con las leyes físicas. El cosmos de Descartes admite un número indefinido de sistemas solares planetarios, cada uno de los cuales gira en torno a su propio sol central, y cada uno de estos soles da vueltas en torno a su eje. La oclusión de las estrellas por manchas, que paulatinamente les impiden expulsar el material más duro que forma su superficie, causa el colapso del vórtice donde se encuentra la estrella; la estrella ocluida se ve forzada a adentrarse en un vórtice vecino, donde, en su movimiento hacia el interior, encuentra una capa donde se halla en equilibrio con el fluido celeste circundante, se convierte en planeta y es transportada alrededor del centro por dicho fluido. (El universo está constituido por vórtices encajantes.)

En la parte cuarta de los *Principia*, apoyada en *Les Meteores*, convierte a la Tierra en objeto de investigación científica y filosófica. Hasta entonces la atención se venía fijando en la actividad sísmica y volcánica, fenómenos reputados propios de las capas superficiales del planeta. Pero el grueso de su constitución interna, inabordable, se suponía inerte. Descartes esboza una interpretación sistemática de la estructura y topografía real de la Tierra. Aplica, para ello, su teoría cosmológica, es decir, reconstruye la formación de la Tierra a partir de una estrella y de su trayectoria hacia el sistema solar. La región más interna del planeta consta de una materia sutil y es de la misma consistencia que el sol, salvo que no es tan pura. La región media consta de un material denso, de una textura similar a la de las manchas solares. Por último, la región más extensa consta de partículas.

El contenido de la parte quinta proyectada se reconstruye aquí con textos de *L'Homme* y *La Description du Corps Humain*. En opinión de Descartes la fisiología animal guarda una relación de continuidad con la fisiología vegetal, en entera consonancia con su reducción mecanicista de los procesos orgánicos. Precisemos, sin embargo, que al asociar el animal a la máquina, no priva a aquél de sensación y cierto grado de cognición; sencillamente, da a estas operaciones una explicación mecanicista al rechazar la existencia de un alma animal. Entre el animal y el hombre media un profundo hiato, objeto la parte sexta de los *Principia*, un verdadero tratado sobre psicología y moral. Por eso, a las fuentes anteriores hemos de agregar aquí *Les Passions*.

Pese a tratarse de un opus básico, los *Principia* procuran incardinar en su esqueleto vertebrador fenómenos de interés manifiesto. Por ejemplo, seísmos y volcanes, en la parte cuarta, que él atribuye al calor interno de la Tierra y a exhalaciones de fluidos combustibles aprisionados violentamente en cavidades subterráneas. Desde el siglo XV, múltiples escritos promovidos por terremotos y erupciones volcánicas de gran intensidad, buscaban aportar una explicación científica tras prestar una detenida atención al episodio (*Giovanni Alfonso Borelli. Storia e meteorologia dell'eruzione dell'Etna del 1669*).

Giovanni Alfonso Borelli, napolitano nacido en 1608, estudió matemáticas en Roma con Benedetto Castelli, discípulo de Galileo. En la ciudad eterna conoce a Evangelista Torricelli, Michel Angelo Ricci y Famiano Michelini, con quienes mantendrá en adelante una duradera correspondencia. Se traslada luego a Messina, para enseñar lo aprendido. Se siente atraído por la fisiología. Y el azar y un episodio catastrófico le impelen a la epidemiología. En los años 1647-48, azota a Sicilia un brote epidémico de tifus que se cobra numerosas víctimas. Borelli es llamado a identificar y atajar la causa de aquella fiebre pútrida. Las conclusiones a que llega las expresa en *Delle ragioni delle febbri maligne di Sicilia negli anni 1647 e 1648* (Cosenza, 1649). Atribuye el morbo a una excesiva presencia en el aire de "corpúsculos" formados por las exhalaciones ponzoñosas provenientes del suelo que una prolongada estación seca

Antropología cultural

O'ODHAM CREATION & RELATED EVENTS. AS TOLD TO RUTH BENEDICT IN 1927. IN PROSE, ORATORY, AND SONG, dirigido por Donald Bahr. The University of Arizona Press; Tucson, Arizona, 2001.

La edición de estos materiales de campo, recogidos por Ruth F. Benedict (1887-1948), entre los *pima* de Arizona en 1927, es muy oportuna, pues pone en juego crítico el alcance científico de los diferentes enfoques epistemológicos dominantes en el interior de las ciencias antropológicas, en especial las de antropología cultural.

En primer lugar, se trata de cuentos y mitos antiguos *pima* transmitidos por la vía oral de una generación a otra, ahora reunidos en forma de un texto homogéneo. Los relatos inciden en ser versiones sobre el origen de la vida, de las creaciones humanas y de historias nativas relacionadas con sucesos diversos ocurridos en la antigüedad y tradiciones culturales de este grupo étnico.

Lo que nos importa de estos materiales es el hecho de que conducen a examinar críticamente un modo, el de Benedict, de aproximarse al estudio antropológico de una comunidad humana, la de los *pima* en este particular. Los relatos y el modo como se obtuvieron son, pues, cuestiones tan importantes como pueden serlo los objetivos y tratamientos analíticos aplicados al estudio de dichos materiales.

Es sabido que Benedict obtuvo su mayor fama personal en su obra, *Patterns of Culture.* En los planteamientos de ésta era notoria la oposición entre el método comparado de distribución cultural en áreas étnicas diversas y el método étnico de composición cultural única en un territorio determinado, propio de la etnografía. Así, cada grupo étnico era diferente de otro, y en los dominios de un impresionismo psicomoral, los *pueblos* de Nuevo México y Arizona serían apolíneos, los *pima* de Arizona serían dionisíacos, los *kwakiutl* del noroeste de Canadá serían megalomaníacos, y los *dobu* de Papúa, Nueva Guinea, serían paranoides.

En este planteamiento, cada colectivo étnico es una individuación cultural. Por esta razón, la identidad tendría su definición en el relativismo cultural. El concepto de patrón cultural sería el paradigma científico del modelo etnográfico. Según eso, la cultura es una experiencia definida en los significados de lo semiótico, y éstos obtienen su valor semántico a partir de su versión émica o dada desde sus protagonistas étnicos.

La cuestión crítica en los materiales de este libro está a cargo de Donald Bahr, coordinador de los textos. A este respecto, son nucleares: 1) que los datos de la tradición oral nunca son etnográficamente completos; 2) que las tradiciones *pima* que forman estos textos no refieren al momento etnográfico contemporáneo de los informantes que las emiten; 3) que por ser memorias transmitidas oralmente, incluyen la imaginación literaria de los informantes; 4) que no son la experiencia de todos los miembros de una cultura; 5) que las creaciones simbólicas de ámbito mitológico son parte de una etnografía, pero son insuficientes cuando se consideran en términos de inventario cultural y de organización social; y 6) que las traducciones del *pima* al inglés construyen una versión corregible.

Desde esta perspectiva, los paradigmas del naturalismo empírico en las ciencias antropológicas tienden a ser intensivos y, sin embargo, no deben perder la conexión con los planteamientos transversales de carácter sincrónico que distinguen a la capacidad asociativa del enfoque de campo.

—CLAUDI ESTEVA-FABREGAT

ha cuarteado. A este escrito le acompaña un opúsculo sobre la digestión (*De in fine si tratta della digestione di cibi con nuovo metodo*), entendida como la acción de un ácido que ataca al bolo nutricio y lo licúa; lo mismo que en el caso de las fiebres, se ofrece una interpretación mecanicista, óptica con la que Borelli considera la fisiología.

Desde febrero de 1656 se halla en Pisa, invitado para ocupar la cátedra de matemática, vacante tras la muerte de Michelini, tarea que comparte con la investigación anatómica y fisiológica en el laboratorio que instalado en su propia casa y al que acuden Marcello Malpighi y Lorenzo Bellini. Inicia allí lo que será su obra maestra sobre el movimiento animal. Deja su sello en astronomía. Pero en 1667 retorna a Messina. Tres años antes, había aparecido *Mundus subterraneus* de Athanasius Kircher, jesuita del Colegio Romano. Entre las estructuras estables de la superficie terrestre numera éste los grandes volcanes activos, vinculados a una red subterránea, con *pyrophilacia* (reservas naturales del fuego), que explica su distribución planetaria, su persistencia y necesidad.

El 11 de marzo de 1669, el Etna entra en actividad. Comienza entonces una de las erupciones más violentas de cuantas se guarda documentación histórica. Un rosario de seísmos de intensidad creciente precede a una fisura de 18 kilómetros de longitud, con múltiples bocas de fuego, cuya lava y cenizas arrasan campos y poblaciones. El cráter central, único hasta entonces, se hunde. El horizonte y el cono apical quedan en parte engullidos, en parte fracturados y lanzados al aire. A solicitud de la Regia Sociedad de Londres y del cardenal Leopoldo de'Medici, Borelli emite en pocos meses una relación de la erupción (*Historia et meteorologia incendii Aetnaei anni 1669*), una de las primeras contribuciones científicas fundamentales para el nacimiento de la vulcanología. Detalla los mecanismos del episodio y los efectos producidos. Aplica los principios de la mecánica de fluidos al movimiento de la lava y los principios de la trayectoria de los proyectiles a la emisión del magma impulsado por la mezcla explosiva subterránea.

La carta de invitación que le llega de la Regia Sociedad de Londres viene firmada por su secretario, Oldenburg (*Henry Oldenburg. Shaping the Royal Society*). Nacido en la ciudad alemana de Bremen, se graduó en teología a los veinte años con una tesis sobre las relaciones entre la Iglesia y el estado. Dominaba el

Corteza de tejo

The story of Taxol. Nature and politics in the pursuit of an anti-cancer drug, por Jordan Goodman y Vivien Walsh. Cambridge University Press; Cambridge, 2001.

En la década de los años sesenta el *Nacional Cancer Institut*, de Estados Unidos, comenzó la búsqueda de plantas que tuvieran principios activos eficaces contra el cáncer. Se investigaron en torno a los catorce mil extractos obtenidos de unas quince mil especies vegetales. Una de ellas era el tejo del Pacífico o *Taxus brevifolia*, de cuya corteza se aisló un compuesto que parecía eficaz contra el cáncer en animales de laboratorio.

Como es habitual, la sustancia aislada comenzó a probarse experimentalmente a finales de los años setenta, y se tardó dieciséis años para que la FDA (*Food and drug Administration*) aprobara su uso contra el cáncer de ovario, de mama, de pulmón, y después, para el sarcoma de Kaposi. Se ensayó la cantidad de droga que el organismo podía soportar, y se encontraron varios casos de personas que desarrollaron hipersensibilidad al producto. El problema de su escasa solubilidad hizo también muy difícil su administración; todo ello frenó los trabajos de investigación y a punto se estuvo de rechazar definitivamente la nueva droga. A esto se unió, además, el hecho de la dificultad de extracción de los principios activos. Entonces el NCI invitó a la industria farmacéutica a que se incorporara a la investigación del nuevo medicamento. Fue la empresa *Bristol-Myers Squibb* la que se interesó en el tema, que pasó a considerarlo como prioritario en sus líneas de trabajo. Mientras tanto se solucionaron algunos problemas relativos a la extracción química de la sustancia en cuestión, a su pureza, su fabricación en las cantidades necesarias, su comercialización, etc. Más tarde se logró también su obtención semisintética, que marca el límite final del período que abarca el libro que nos ocupa.

El tema llegó a la opinión pública, quien demandó la producción de la droga en cantidades suficientes para abastecer el mercado. Sin embargo, mientras hacía falta la planta para la obtención del taxol, significaba la tala masiva de árboles cuyo crecimiento es, además, muy lento. Esto puso en pie de guerra a los movimientos ecologistas.

Bristol-Myers patentó el producto sin que parte de los grandes beneficios que ha obtenido con el medicamento retornaran a las arcas públicas, que fueron en definitiva las que sufragaron los principales gastos de la investigación. Los excesivos precios cobrados por el medicamento de patente han sido considerados por algunos como una verdadera estafa al gobierno, a los enfermos y a las aseguradoras.

Esta es la historia que, de forma amena y detallada, narran Jordan Goodman y Vivien Walsh del Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester. Hay que tener en cuenta que el título es *Story* y no *History*, en el sentido de “narración y exposición de acontecimientos”, y no contempla la historia del taxol en el contexto de una historia de los medicamentos o de la farmacoterapia al uso; ignora, por ejemplo, la parte correspondiente a los trabajos de investigación llevados a cabo en Francia con el mismo género de plantas y con otras sustancias obtenidas de las hojas con efectos parecidos a los del taxol. Las fuentes que han utilizado los autores son de tres tipos: materiales no publicados, como informes, memorias, cartas, etc.; bibliografía secundaria e información de tipo científico y técnico; y datos procedentes de una larga serie de entrevistas con personas más o menos implicadas en el tema. La investigación se llevó a cabo gracias a una ayuda de la *Nuffield Foundation* y del *Wellcome Trust*. Finalmente una editorial de prestigio ha publicado los resultados.

El libro tiene tres partes: la primera se ocupa de los agentes protagonistas de la historia. La segunda aborda lo sucedido entre 1962 y 1975; 1973 y 1983; y 1984 y 1989. La tercera se consagra a los aspectos más controvertidos como las políticas de exclusividad y los negocios del taxol, los detalles institucionales, las denuncias y demandas de los competidores de *Bristol-Myers Squibb* y de los usuarios del producto, etc. Tiene un aparato crítico muy bien construido y cuenta también con una bibliografía secundaria amplia.

Un libro, en definitiva, que muestra al gran público los entresijos que puede llegar a haber detrás de un medicamento que ha demostrado ser eficaz.

—José Luis Fresquet Febrer

latín, holandés, francés, italiano e inglés y llegó a adquirir profundos conocimientos de filosofía natural, de astronomía y matemática. Viajó por toda Europa. Y en 1653 su ciudad natal le encarga una misión diplomática ante Cromwell para asegurar la neutralidad de Bremen en la guerra anglo-holandesa. Permanece en Inglaterra, en cuyos círculos intelectuales se introduce de forma paulatina. Con ese fin se matricula incluso en la Universidad de Oxford. Su relación con Boyle y Wilkins le abre las puertas del Club Filosófico de Oxford, al que pertenecían, amén de éstos, Seth Ward, Jonathan Goddard, Christopher Wren, Richard Lower y Robert Hooke, el núcleo fundador, tras la Restauración, de la Regia Sociedad.

Con su pupilo Jones vuelve a cruzar el canal en 1567 para un viaje de tres años, durante el cual irá estrechando lazos con figuras prominentes de la ciencia europea. Particularmente provechosa fue la visita a la Academia Montmor de París, cuya finalidad, de acuerdo con los estatutos, no era la vana lucubración sobre cuestiones inútiles, sino, junto con el más claro conocimiento de las obras de Dios, las cuestiones que pueden mejorar las condiciones de vida, las artes y las ciencias. Una finalidad claramente consonante con el baconianismo que Oldenburg había asimilado en Inglaterra y que orientará sus principales empeños, la Regia Sociedad y las *Philosophical Transactions*.

El acto fundacional de la Regia Sociedad se fecha en noviembre de 1660, cuando Petty y otros se reunieron para crear una asociación destinada a promover el conocimiento experimental físico-matemático, que se congregaría una vez a la semana,

presidida por Wilkins. En la segunda sesión (5 de diciembre de 1660) se redactan unos estatutos provisionales sobre elección de los miembros y funciones a desempeñar; se propone la contratación de amanuenses y un auxiliar de experimentos. En 1662 la asociación se convirtió oficialmente en Regia Sociedad de Londres. El documento real sancionador nombraba presidente a Lord Brouncker y, secretarios, a Wilkins y Oldenburg. Pero el peso de la institución recayó sobre el último.

La otra gran obra de Oldenburg, complementaria de la anterior, fueron las *Philosophical Transactions*. Creadas y puestas bajo su dirección en 1665, debían tener periodicidad mensual ("si dispone de originales suficientes"). El título completo del primer número rezaba: "Philosophical Transactions: Giving Some Account of the Present Undertankings, Studies, and Labours of the Ingenious in many Considerable Parts of the World", reflejo de un interés manifiesto por el avance de la filosofía natural allí donde se produjera. El número inicial, de 16 páginas, contenía descripciones de telescopios romanos, muy apreciados entonces, la observación de Hooke de una mancha en Júpiter, exposición de un cometa por Auzout, un resumen de la *History of Cold* de Boyle, un relato de un ternero monstruoso, un informe anónimo sobre minerales alemanes y húngaros, la caza de ballenas en las Bermudas y uso de los relojes de péndulo en el mar, así como una reseña necrológica del matemático Fermat.

De Oldenburg enteramente fue la red tejida entre los principales científicos y filósofos de ambos lados del canal, más de setenta como leemos en el extenso epistolario publicado también por la autora y A. Rupert Hall. Sirvió, en múltiples ocasiones, de catalizador y vehículo de ideas ajenas. Entre otras controversias, la famosa disputa de Leibniz con Newton, a propósito de la prioridad del descubrimiento del cálculo, se hizo a través de Oldenburg.

Fundador también él de una importante revista científica (*Acta eruditorum*) y primer presidente de la Sociedad de Ciencias de Berlín, Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), culmina, y volvemos a *Die Philosophie des 17.Jahrhunderts*, el desarrollo de la filosofía natural del Barroco de corte racionalista. De intereses enciclopédicos, iluminó la geología, lingüística, matemática y física. En filosofía conocía con igual profundidad la neoescolástica que las teorías contemporáneas de Hobbes, Gassendi o Locke. En teoría del conocimiento, rechazaba que la mera inducción enumerativa diera cuenta de las verdades contingentes particulares; él prefería un método conjetural a priori, un precursor del método hipotético-deductivo. Idea que respaldó con el desarrollo de una teoría formal de la probabilidad. Una idea acorde con su pretensión del establecimiento de un lenguaje universal (*characteristica universalis*), expresado en forma simbólica que permitiera a todos usar los mismos símbolos con el mismo significado.



Henry Oldenburg (1619-1677)

Procuró manifestar nítida su discrepancia del cartesianismo dominante en Europa. "En las cosas sólo hay sustancias simples y, en éstas, sólo percepción y apetito", expuso. Espacio y tiempo constituyen entidades ideales. Además de éstas, había que contar con los fenómenos (entidades materiales) y con las mónadas. Estas últimas, entidades reales, eran absolutamente simples, no materiales, carentes de extensión o partes y, por ende, indivisibles, infinitas en número, sin comienzo ni fin natural. En física, sostenía que la aplicación correcta del descubrimiento de Galileo sobre la aceleración de la caída libre de los graves a los fenómenos de impacto indica que la fuerza no debe identificarse con cantidad de movimiento (masa por velocidad), que era la tesis de Descartes, sino masa por el cuadrado de la velocidad. La fuerza, afirmaba, es una propiedad central de los objetos materiales; por tanto, concluía, Descartes yerra al pretender reducir la materia a extensión y sus modificaciones.

—Luis Alonso

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Cinco bengalas de fiar

Tiene usted dos cajas de seis bengalas cada una. En una de ellas hay tres inservibles. La llamaremos “caja mala”, aunque no sepamos cuál es de las dos. Para saber si una bengala es buena hay que encenderla (pues buenas y malas tienen todas idéntico aspecto). La prueba es destructiva: una vez encendida, la bengala no puede utilizarse por segunda vez.

Supongamos que tiene usted que partir hacia el Artico. ¿Sabrá hallar un método para seleccionar cinco bengalas de modo que la probabilidad de que todas estén en buen estado sea de por lo menos 3/4? ¿Cómo quedaría modificada esa probabilidad si la caja mala contuviera, en lugar de 3, cuatro bengalas inservibles?

Problema preliminar 1. ¿Cómo podríamos estar seguros de tener dos bengalas útiles, sin destruir más de cuatro, suponiendo que la caja mala tiene tres bengalas inservibles? *Solución*: Empezamos ensayando bengalas de una de las cajas. Si después de haber encendido cuatro encontramos una inservible, sabremos que hemos elegido la caja mala; por consiguiente, se toman dos de la otra caja (la buena). Recíprocamente, si encontramos cuatro bengalas buenas en una de las cajas, tendremos la certeza de haber elegido la caja buena; tomamos entonces las dos que quedan.

Problema preliminar 2. ¿Cómo podríamos tener una probabilidad de 1/4 de conseguir 7 bengalas buenas si la caja mala contiene, como antes, tres defectuosas? *Solución*: Se toma al azar una de las cajas, con lo que se tienen seis bengalas. Se toma después la séptima bengala de la otra. Se tiene una probabilidad de 1/2 de haber elegido la caja buena. De ser así, la séptima bengala será elegida de la caja mala; la probabilidad de que incluso entonces la bengala elegida funcione es 1/2 (tres de seis). Estas dos elecciones son independientes; así que la probabilidad de haber elegido 7 bengalas en buen estado es 1/4 (1/2 × 1/2). Dicho de otro modo, según las leyes de la probabilidad, sería de esperar que 50 de cada 100 personas eligieran la caja buena, y de éstas, la mitad tomaría seguidamente una bengala buena de la caja mala, lo que da un total de 25 por ciento. Observemos que si una de las cajas contuviera cuatro bengalas inservibles, sólo dos de las seis funcionarían, y la probabilidad de seleccionar siete buenas descendería a 1/6 (1/2 × 1/3).

Solución del problema del mes pasado:

Se activa C4 durante siete segundos, D4 durante 10 segundos, E6 durante 7 segundos y F6 durante 13 segundos. La proteína T sonará entonces una vez a los 45 segundos, y después, una vez cada 70 segundos (a los 115, 185, y así sucesivamente). Puede verse una explicación completa en www.investigacionyciencia.es.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

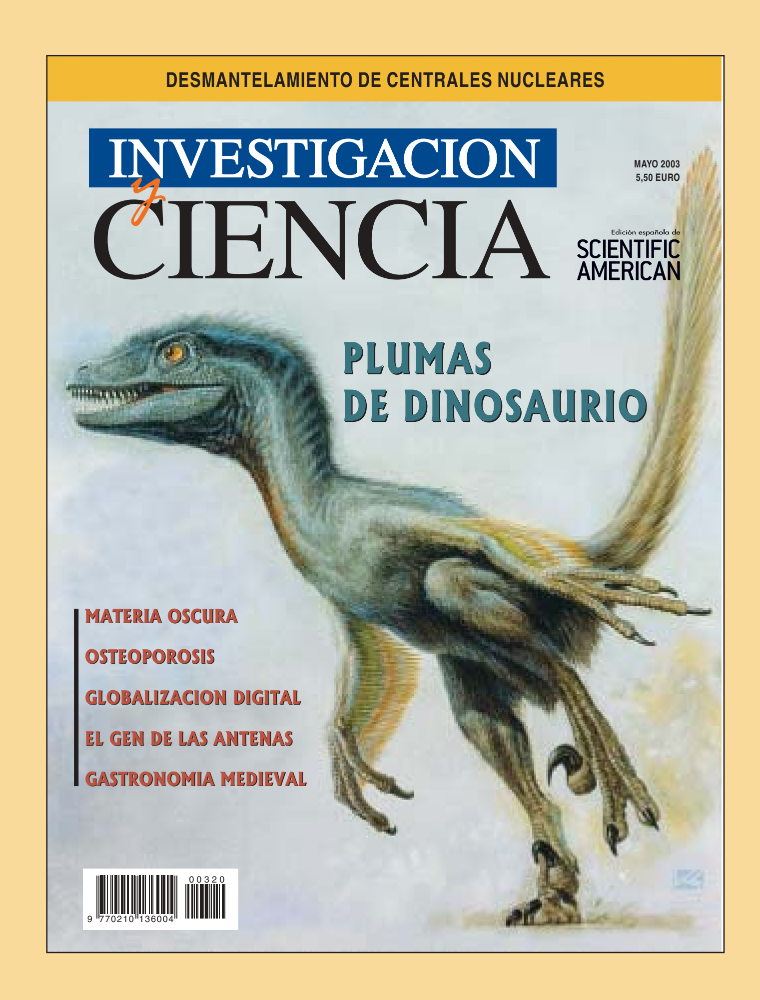


HEIDI NOLAND



EL PROBLEMA: Consideremos dos cajas de seis bengalas. Una pila contiene 3 bengalas inútiles con apariencia de buenas (*izquierda*). Encontremos un método que asegure 5 bengalas buenas al menos tres cuartas partes de las veces, como en la figura.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA BUSQUEDA DE LA MATERIA OSCURA, por David B. Cline
Solemos asociar la materia oscura con algo invisible. Favorece esa idea la dinámica de las galaxias, que sugiere la existencia de materia exótica. Ahora, con la intención de capturar sus partículas intangibles, los físicos comienzan a tender las primeras trampas.

DESMANTELAMIENTO DE CENTRALES NUCLEARES, por Matthew L. Wald
Desmontar una central nuclear que ha llegado al término de su vida útil es un asunto muy complejo, aunque tal vez por razones insospechadas.

OSTEOPOROSIS Y SU REMEDIO, por Clifford J. Rosen
La degeneración del hueso por osteoporosis puede producir serias alteraciones del movimiento, pero el conocimiento detallado de cómo nuestro organismo construye el hueso nos permite ya una mejor prevención y seguir nuevas opciones terapéuticas.

GLOBALIZACION DE LA CULTURA DIGITAL, por Harvey B. Feigenbaum
Nuevas técnicas de difusión están obviando las restricciones a la difusión de programas y películas estadounidenses.

PLUMAS DE DINOSAURIO, por Richard O. Prum y Alan H. Brush
Las plumas se originaron y diversificaron en los dinosarios, antes que las aves iniciaran su evolución.

LOS GENES DETERMINANTES DE LAS ANTENAS, por Fernando Casares
En la mosca del vinagre, el gen homothorax *selecciona la identidad de la antena. Los genes selectores organizan el patrón corporal en todos los animales. En el ratón, el gen homólogo de* homothorax *es el protooncogén Meis-1.*

PLANETAS LIBRES Y CUMULOS ESTELARES, por Jarrod R. Hurley y Michael M. Shara
Los científicos han buscado planetas en lugares exóticos, muy lejos de sus estrellas progenitoras, dentro de los cúmulos de estrellas más densos de la galaxia.

LA GASTRONOMIA MEDIEVAL, por Bruno Laurioux
En la Edad Media, la cocina era un arte. Las especias llegadas de Oriente acompañaban tanto a sopas espesas como a platos de aves y a entremeses. La dietética se convierte en una preocupación para los médicos, que consideran a los alimentos no sólo como un medio para tratar ciertas enfermedades, sino también para prevenirlas.

